



TESIS (RC-142501)

EVALUASI PERILAKU GESER KOLOM BETON BERTULANG MUTU TINGGI DENGAN MENGGUNAKAN METODE UNIAXIAL SHEAR FLEXURE

TEDDY YUSTIONO

31 15 202 012

PEMBIMBING

Dr. Techn Pujo Aji, ST., MT.

Harun Alrasyid, ST., MT., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER STRUKTUR

JURUSAN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2017



TESIS (RC-142501)

EVALUASI PERILAKU GESER KOLOM BETON BERTULANG MUTU TINGGI DENGAN MENGGUNAKAN METODE UNIAXIAL SHEAR FLEXURE

TEDDY YUSTIONO

31 15 202 012

PEMBIMBING

Dr. Techn Pujo Aji, ST., MT.

Harun Alrasyid, ST., MT., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER STRUKTUR

JURUSAN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2017

LEMBAR PENGESAHAN


Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)

di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

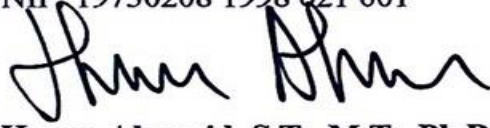
Oleh:
Teddy Yustiono
NRP. 3115 202 012

Tanggal Ujian : 11 Juli 2017
Periode Wisuda : September 2017

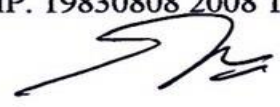
Disetujui oleh:


1. **Dr. techn. Pujo Aji, S.T., M.T.**
NIP. 19730208 1998 021 001


(Dosen Pembimbing I)


2. **Harun Alrasvid, S.T., M.T., Ph.D.**
NIP. 19830808 2008 121 005

(Dosen Pembimbing II)


3. **Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D.**
NIP. 19800430 2005 011 002

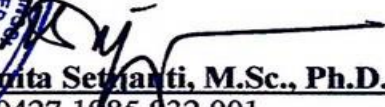
(Dosen Penguji I)


4. **Dr. Ir. Djoko Irawan, M.S.**
NIP. 19590213 1987 011 001

(Dosen Penguji II)



Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


R. Purwanita Setiawati, M.Sc., Ph.D.
NIP. 19590427 1985 032 001

STATEMENT OF COMPLIANCE

I hereby truthfully declare that this thesis is original work prepared by me; that I have behaved in accordance with the scientific, ethical principles and rules throughout the stages of preparation, data collection, analysis and presentation of my work; that I have cited the sources of all data and information that could be obtained within the scope of this study, and included these sources in the reference section; and that this study has been scanned for plagiarism.

Surabaya, July 2017

Author,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Teddy Yustiono', written in a cursive style.

Teddy Yustiono

**EVALUASI PERILAKU GESER KOLOM BETON BERTULANG MUTU
TINGGI DENGAN MENGGUNAKAN METODE UNIAXIAL SHEAR
FLEXURE**

Nama Mahasiswa : Teddy Yustiono
NRP : 3115 202 012
Jurusan : Teknik Sipil FTSP-ITS
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Tech Pujo Aji ST., MT
2. Harun Alrasyid ST., MT., Ph.D.

ABSTRAK

Pembangunan hunian vertikal yang tinggi semakin banyak diminati dan dibangun oleh para pengembang di kota metropolitan. Penggunaan material beton bertulang menjadi hal yang paling diminati dikarenakan material tersebut tahan terhadap api, mempunyai durabilitas yang baik, harga konstruksi yang murah, dan memiliki kekakuan yang besar. Penggunaan beton bertulang mutu normal dapat mengakibatkan dimensi kolom menjadi lebih besar. Untuk mengatasi hal tersebut maka penggunaan beton bertulang mutu tinggi dapat dijadikan solusi untuk mengatasi hal tersebut. Meskipun menggunakan kolom dengan material tinggi, aspek rasio yang dihasilkan masih tetap rendah. Sehingga kolom akan cenderung berperilaku geser disbanding berperilaku lentur.

Penelitian ini akan membahas perilaku kegagalan geser pada elemen kolom beton bertulang mutu tinggi. Metode yang digunakan adalah Uniaxial Shear Flexure. Metode Uniaxial Shear Flexure menghasilkan perilaku yang kurang mendekati dari hasil ekseperimental dikarenakan tulangan transversal diasumsikan pada kondisi leleh, oleh karena itu akan diusulkan metode modified uniaxial shear flexure yang menghitung nilai tegangan leleh yang terjadi pada masing-masing spesimen. Hasil prediksi dengan menggunakan metode ini akan dibandingkan dengan hasil eksperimental pada kolom beton bertulang mutu tinggi.

Setelah menghitung nilai tegangan leleh pada tulangan transversal, memiliki hasil tegangan leleh pada tulangan transversal yang tidak mencapai tegangan leleh yang direncanakan. Dengan mempergunakan metode modified uniaxial shear flexure dihasilkan perilaku geser pada kolom yang lebih menyerupai dengan hasil eksperimental.

Kata kunci: high strength reinforced concrete, Uniaxial shear flexure method

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

EVALUATION OF SHEAR BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS USING HIGH QUALITY MODIFIED UNIAXIAL SHEAR

FLEXURE

Name : Teddy Yustiono
NRP : 3115 202 012
Departement : Teknik Sipil FTSP-ITS
Advisor : 1. Dr. Tech Pujo Aji ST., MT
2. Harun Alrasyid ST., MT., Ph.D.

ABSTRACT

Construction of a high vertical housing more and more popular and built by the developers in the metropolis. The use of reinforced concrete material becomes the most desirable because the material is resistant to fire, has good durability, price cheap construction, and has a great rigidity. The use of reinforced concrete normal quality can result column dimensions become larger. To overcome this problem, the use of high strength reinforced concrete can be used as a solution to overcome it. Although using column with high material, the resulting aspect ratio remains low. So the column will tend to behave sliding flexure compared behave.

This study will discuss the behavior shear failure on the elements of high-quality reinforced concrete columns. The method used is Uniaxial Shear Flexure. The uniaxial shear flexure method has behavior that is less close to the experimental result because transversal reinforcement is assumed in yirld condition. Therefore, it will be proposed a modified uniaxial shear flexure method that calculates the value of yield strength of transversal reinforcement that occur in each specimen. The predicted results using this method will be compared with the experimental result in high strength reinforced concrete columns.

After calculating the value of yield stress in transversal reinforcement, the yield strength of transversal reinforcement is not satisfied. By using the modified uniaxial shear flexure method, shear flexure behavior more similar with the eperimental results.

Keywords: high strength reinforced concrete, Uniaxial shear flexure method

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

| | |
|---|-----|
| ABSTRAK | i |
| ABSTRACT | iii |
| DAFTAR ISI | v |
| DAFTAR GAMBAR | vii |
| DAFTAR TABEL | ix |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Permasalahan | 3 |
| 1.3 Batasan Masalah | 4 |
| 1.4 Tujuan | 4 |
| BAB II STUDI LITERATUR | 5 |
| 2.1 Pendahuluan | 5 |
| 2.2 Material Mutu Tinggi | 5 |
| 2.2.1 Beton Mutu Tinggi..... | 5 |
| 2.2.2 Tulangan Mutu Tinggi | 6 |
| 2.3 Eksperimental yang Telah Dilakukan | 9 |
| 2.3.1 Penelitian Ou dan Kurniawan (2015) | 9 |
| 2.3.2 Penelitian Mostafaei, Vecchio, and Kabeyasawa (2005-2008) | 10 |
| 2.3.3 Penelitian Harun Alrasyid (2016) | 12 |
| 2.4 Uniaxial Shear Flexure Model..... | 13 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN..... | 22 |
| 3.1 Bagan Alir Penelitian | 22 |
| 3.2 Studi Literatur..... | 26 |
| 3.3 Premilimnary Design Model Kolom Beton Bertulang Mutu Tinggi..... | 26 |
| 3.4 Metode USFM | 27 |
| 3.4.1 Penginputan Material Properti | 27 |
| 3.4.2 Perhitungan nilai K, Zm, Fp | 27 |
| 3.4.3 Perhitungan Nilai Maksimum Regangan Tarik pada Beton (ϵ_1)..... | 28 |
| 3.4.4 Perhitungan Nilai Maksimum Regangan Tekan pada Beton (ϵ_2) | 28 |
| 3.4.5 Perhitungan Tegangan Tarik Utama pada Beton (f_{c1}) | 29 |
| 3.4.7 Perhitungan Tegangan Tekan Utama pada Beton (f_{c2}) | 29 |
| 3.4.8 Perhitungan Total Nilai Drift Ratio (γ) | 29 |
| 3.4.9 Perhitungan Nilai Lateral Load..... | 30 |
| 3.4.10 Perilaku Geser Kolom Beton Bertulang Mutu Tinggi | 30 |
| 3.5 Metode Modified USFM | 30 |
| 3.5.1 Penginputan Material Properti | 30 |
| 3.5.2 Perhitungan nilai Fs (Tegangan Leleh pada Tulangan Transversal) | 30 |
| 3.5.3 Perhitungan Constitutive Law Baru | 31 |
| 3.5.4 Perhitungan Nilai Maksimum Regangan Tarik pada Beton (ϵ_1)..... | 33 |
| 3.5.5 Perhitungan Nilai Maksimum Regangan Tekan pada Beton (ϵ_2) | 33 |
| 3.5.6 Perhitungan Tegangan Tarik Utama pada Beton (f_{c1}) | 33 |
| 3.5.7 Perhitungan Tegangan Tekan Utama pada Beton (f_{c2}) | 34 |
| 3.5.8 Perhitungan Total Nilai Drift Ratio (γ) | 34 |
| 3.5.9 Perhitungan Nilai Lateral Load..... | 34 |
| 3.5.10 Perilaku Geser Kolom Beton Bertulang Mutu Tinggi | 34 |

| | |
|---|----|
| 3.6 Perbandingan Perilaku Geser Kolom Beton Bertulang Mutu Tinggi | 35 |
| BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN..... | 36 |
| 4.1 Umum | 36 |
| 4.1 Perhitungan Nilai Kekuatan Leleh pada Tulangan Transversal | 36 |
| 4.2 Perhitungan Nilai Lateral Load | 37 |
| 4.3 Hasil Perbandingan Perilaku Kolom Beton Bertulang Mutu Tinggi..... | 37 |
| BAB V | 46 |
| DAFTAR PUSTAKA | 48 |
| LAMPIRAN | 50 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 2.1 Tulangan SD685 untuk tulangan longitudinal..... | 8 |
| Gambar 2.2 Tulangan SD785 untuk tulangan transversal..... | 8 |
| Gambar 2.3 Desain Spesimen: (a) spesimen A-1,A-2,B-1,B-2,C-1,C-2,D-1,D-2; (b) specimen A3,A-4,B-3,B-4,C-3,C-4,D-3,D-4. (Ou and Kurniawan 2015) | 9 |
| Gambar 2.4 Pola retak dan Mode Kegagalan Kolom (Mostafei et all, 2008)..... | 11 |
| Gambar 2.5 Desain Spesimen: (a) spesimen A-3.1, B-3.1; (b) spesimen B-5, C-5, D-5; (c) spesimen A-6, B-6, C-6, D-6 (Harun Alrasyid 2015) | 12 |
| Gambar 2.6 Axial-shear-flexure interaction pada metode ASFI..... | 14 |
| Gambar 2.7 Deformasi kolom Axial-shear-flexure pada metode ASFI..... | 14 |
| Gambar 2.8 Concrete compression constitutive law | 15 |
| Gambar 2.9 Concrete tensile constitutive law..... | 15 |
| Gambar 2.10 Constitutive law for reinforcing bars..... | 15 |
| Gambar 2.11 Proposed Model..... | 19 |
| Gambar 3.1 Bagan Alir Perbandingan Metode USFM, Metode Modified USFM dan Eksperimental | 24 |
| Gambar 3.2 Bagan Alir Metode USFM | 25 |
| Gambar 3.3 Bagan Alir Metode Modified USFM | 26 |
| Gambar 3.4 Desain Spesimen: (a) spesimen A-3.1, B-3.1; (b) spesimen B-5, C-5, D-5; (c) spesimen A-6, B-6, C-6, D-6..... | 28 |
| Gambar 4.1 Desain Spesimen: (a) spesimen A-3.1, B-3.1; (b) spesimen B-5, C-5, D-5; (c) spesimen A-6, B-6, C-6, D-6..... | 40 |
| Gambar 4.2 Lateral load vs total drift ratio A 3-1..... | 40 |
| Gambar 4.3 Lateral load vs total drift ratio A-6..... | 41 |
| Gambar 4.4 Lateral load vs total drift ratio B 3-1 | 41 |
| Gambar 4.5 Lateral load vs total drift ratio B-5 | 42 |
| Gambar 4.6 Lateral load vs total drift ratio B-6 | 42 |
| Gambar 4.7 Lateral load vs total drift ratio C-5 | 43 |
| Gambar 4.8 Lateral load vs total drift ratio C-6..... | 43 |
| Gambar 4.9 Lateral load vs total drift ratio D-5..... | 44 |
| Gambar 4.10 Lateral load vs total drift ratio D-6..... | 44 |

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2.1 Macam-macam tulangan USD685,USD785 dari jepang dan SD685,SD785 dari Taiwan..... | 7 |
| Tabel 2.2 Macam-macam tulangan USD685,USD785 dari jepang dan SD685,SD785 dari Taiwan..... | 10 |
| Tabel 2.3 Pengaplikasian beban kolom pada retak diagonal dan kondisi ultimate | 13 |
| Tabel 4.1 Hasil Perhitungan Nilai Kekuatan Leleh yang Terjadi pada Tulangan Transversal | 37 |
| Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Lateral Load | 38 |
| Tabel 4.3 Data Spesimen Kolom..... | 39 |

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan hunian vertikal semakin banyak dibangun di kota-kota besar, khususnya di kota metropolitan. Banyak developer besar berlomba – lomba untuk membuat bangunan hunian vertikal yang tinggi, sehingga merupakan tantangan tersendiri untuk Teknik Sipil untuk memenuhi permintaan tersebut. Terdapat beberapa pilihan untuk membuat elemen-elemen struktural pada bangunan, tetapi sampai sekarang sistem reinforced concrete adalah sistem yang paling menguntungkan karena tahan terhadap api (Jung-Yoon le et all, 2015), mempunyai durability yang bagus, harga yang tergolong murah, memiliki kekakuan yang besar dan juga biaya pemeliharaan yang murah. Pada bangunan hunian vertikal yang tinggi, beton mutu normal kurang efektif digunakan, dikarenakan kebutuhan arsitektural yang mengharuskan membuat elemen-elemen sekecil mungkin khususnya pada elemen kolom. Penggunaan material beton bertulang dengan kekuatan mutu tinggi adalah merupakan solusi agar dapat membuat elemen kolom lebih ramping jika dibandingkan dengan menggunakan beton mutu biasa.

Penelitian tentang beton bertulang mutu tinggi sudah mulai dikembangkan di negara jepang pada tahun 1990-1995. Pada tahun 1988, Pemerintahan jepang menyatakan untuk membantu proyek penelitian yang berjudul “Development of Advanced Reinforced Concrete Buildings using High-strength Concrete and High-strength reinforcement (biasanya dapat disebut dengan “New RC”)

(Aoyama,2001). Pada penelitian ini dimulai dengan meneliti kuat tekan betan 30 sampai dengan 120 Mpa, dan juga memakai kualitas baja dengan spesifikasi 400 sampai dengan 1200 Mpa. Setelah bebarapa tahun melakukan penelitian, pada tahun 1995, Jepang memproduksi beton mutu tinggi dengan kuat tekan beton sebesar 40 Mpa sampai dengan 100Mpa dan juga secara bersamaan memproduksi tulangan longitudinal dengan spesifikasi kuat leleh baja antara 650 sampai dengan 980 Mpa dan tulangan transversal dengan spesifikasi kuat leleh baja antara 785 sampai dengan 1275 Mpa.(Nishiyama,2009)

Pada tahun 2010, Taiwan Concrete Institute (TCI) juga meneliti tentang beton mutu tinggi. Dari studi literature, beton mutu tinggi dengan spesifikasi kuat tekan dari 70 sampai 100 Mpa sudah diproduksi dan digunakan untuk gedung vertikal yang tinggi. Terdapat dua kuat leleh pada tulangan longitudinal yaitu 685 Mpa dan untuk kuat leleh pada tulangan horizontal 785 Mpa juga diproduksi oleh Taiwan.(Lee,2015)

Di Amerika serikat, penggunaan beton mutu tinggi juga dikembangkan oleh ACI Committee 363 2010. Pada tahun 1960an beton dengan kuat tekan 41 dan 52 Mpa sudah pernah diproduksi. Sekarang kuat tekan beton yang diproduksi untuk memenuhi kebutuhan gedung vertikal yang tinggi adalah sebesar 138 Mpa. Sedangkan untuk kuat lentur tulangan juga berkembang dari 380 Mpa sampai dengan 827 Mpa.(Caldrone,2008)

Pada saat gempa terjadi kegagalan geser pada kolom harus dihindari. Kegagalan geser pada kolom disebabkan hilangnya kekuatan lateral secara cepat. Kajian experimental mengenai perilaku geser pada beton bertulang telah dilakukan oleh Aoyama (2001), Ou and Kurniawan (2015b), Harun Alrasyid (2016). Secara umum hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa (1) Semakin tinggi beban aksial yang diberikan maka kuat geser beton (V_c) akan semakin tinggi. (2) Tulangan mutu tinggi tidak mencapai kekuatan leleh pada saat kolom mengalami geser ultimate (3) Semakin tinggi beban aksial maka semakin cepat kolom kehilangan kekuatan gesernya.

Hingga saat ini penelitian mengenai kajian numerik mengenai perilaku geser pada kolom bertulang mutu tinggi masih sedikit. Pada umumnya perilaku suatu elemen struktur diprediksi dengan metode finite elemen. Akan tetapi penggunaan metode finite element menjadikan biaya suatu analisa prediksi perilaku kolom menjadi mahal. Hal ini disebabkan analisa finite element kompleks dan membutuhkan waktu yang tidak sedikit. Selain itu, program finite elemen komersil sangat mahal. Sehingga dibutuhkan metode alternative untuk memprediksi perilaku geser pada kolom.

Perilaku geser dan lentur suatu kolom telah dipelajari selama satu decade. Pada kasus lentur, analisa penampang, dan model fiber satu dimensi dapat memberikan prediksi yang baik terhadap kekuatan ultimate dan deformasi leleh. Akan tetapi perilaku geser pada kolom tidak dapat diprediksi analisa penampang, karena perilaku geser tidak diikutsertakan dalam perhitungan analisa penampang. Berberapa metode prediksi perilaku geser telah dikembangkan diantaranya metode truss (Vecchio, F.J. and H. Mostafaei, 2008)

Metode prediksi perilaku aksial, geser, dan lentur (Axial Shear Flexure Interaction (ASFI)) pada kolom telah dikembangkan oleh Mostafaei dan Kabeyasawa. Metode ini menggunakan kombinasi analisa penampang dan Modified Compression Field Theory (MCFT) untuk memprediksi perilaku geser dan lentur pada kolom beton bertulang. Karena aplikasi MCFT untuk memprediksi geser membutuhkan intensitas dan proses interaksi yang rumit maka H. Mostafaei and F. J. Vecchio (2008) mengusulkan model uniaxial-shear-flexure. Metode ini menyederhanakan dan mengeliminasi proses iterasi pada model geser dari ASFI. Kedua metode ini cukup presisi dalam memprediksi perilaku kolom beton bertulang dengan mutu normal. Pada penelitian ini metode USFM akan digunakan untuk memprediksi perilaku geser pada kolom beton bertulang mutu tinggi. Pada penelitian ini Metode Uniaksial Shear Flexure Method (USFM) akan dipakai untuk mengevaluasi perilaku geser pada kolom beton bertulang mutu tinggi yang nanti akan didapatkan nilai kapasitas penampang kolom beton bertulang yang akan dimodelkan.

1.2 Permasalahan

Bedasarkan latar belakang yang ada maka fokus masalah yang dibahas pada penelitian ini adalah bagaimana memprediksi perilaku kolom beton bertulang mutu tinggi dengan metode USFM. Adapun detail rumusan masalah pada penelitian dapat dilihat sebagai berikut :

1. Bagaimana cara memprediksi perilaku geser struktur elemen kolom beton bertulang mutu tinggi dengan metode USFM ?

2. Bagaimana cara memprediksi perilaku geser struktur elemen kolom beton bertulang mutu tinggi dengan metode modified USFM ?
3. Bagaimana menyimpulkan dari perbandingan hasil analisa kolom dengan metode USFM , metode Modified USFM dan hasil ekperimental ?.

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian menghasilkan prediksi yang akurat maka batasan masalah yang diberikan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Kolom yang dibahas hanya yang mengalami kegagalan geser
2. Penampang kolom yang dibandingkan adalah penampang kolom persegi.

1.4 Tujuan

Bedasarkan latar belakang di atas maka didapat tujuan penelitian ini adalah untuk memprediksi perilaku kolom beton bertulang mutu tinggi dengan metode USFM. Sedangkan tujuan rinci dari penelitian ini adalah :

1. Mendapatkan prediksi geser dan lentur pada kolom beton bertulang mutu tinggi dengan metode USFM
2. Mendapatkan prediksi geser dan lentur pada kolom beton bertulang mutu tinggi dengan metode Modified USFM
3. Mendapatkan kesimpulan hasil perbandingan prediksi USFM, Modified USFM dan hasil eksperimental

BAB II

STUDI LITERATUR

2.1 Pendahuluan

Pada bab ini akan dijelaskan tentang literatur-literatur, gambaran tentang hasil eksperimen perilaku geser dari beton mutu tinggi pada kolom. Perkembangan tentang beton mutu tinggi dan tulangan mutu tinggi akan dipaparkan pada awal bab ini. Pada bab ini juga akan menunjukkan penelitian-penelitian terdahulu tentang kegagalan geser pada kolom dengan menggunakan beton dan tulangan mutu tinggi. Metode penyederhanaan perhitungan gaya axial-geser dari ASFI-Axial Shear Flexure Iteration dengan menggunakan Modified Compression Field Theory (MCFT) juga akan dijelaskan pada tinjauan pustaka, sehingga diharapkan penulis dapat mengerjakan thesis dengan literatur-literatur yang ada.

2.2 Material Mutu Tinggi

2.2.1 Beton Mutu Tinggi

Mutu tinggi adalah sebuah istilah yang tergantung pada banyak hal, seperti kualitas barang lokal dan konstruksi pelaksanaan (Caldarone, 2008). Faktor Primer dalam pengukuran beton meliputi, geometri dari spesimen, ukuran, umur, proses curing. Parameter pengujian meliputi kapasitas pembebanan, kekakuan arah memanjang dan melintang, dan juga keragaman distribusi juga mempengaruhi kekuatan dari beton tersebut. Parameter beton dikatakan menjadi beton mutu tinggi berbeda di setiap negara. Di Amerika Serikat, pada 1950-an, beton mutu tinggi digambarkan untuk beton dengan kuat tekan lebih dari 34 MPa. Dalam 1960 – 1970 beton mutu tinggi telah digunakan secara komersial dengan kuat tekan mulai 41 – 62 MPa. Saat ini, beton mutu tinggi tersedia secara komersial mulai dari 60 MPa sampai 100 MPa. Meskipun deskripsi beton mutu tinggi telah berubah selama bertahun-tahun, Komite ACI 363 saat ini telah memilih 55 MPa sebagai batas bawah dari beton mutu tinggi. (Caldarone, 2008)

Terdapat perbedaan mendasar antara beton mutu tinggi dengan beton mutu biasa. Untuk beton mutu tinggi, material agregat akan diikat oleh pengikat yang kuat dan material yang padat, sedangkan untuk beton mutu biasa mempunyai

pengikat yang lebih lemah dan tidak padat. Perbedaan yang lain antara beton mutu tinggi dan beton mutu biasa. Pada beton mutu tinggi, apabila terjadi kegagalan geser maka kegagalan tersebut akan memisahkan agregat kasar dengan pasta, sedangkan kegagalan pada beton mutu tinggi akan memecah batuan, sehingga pada beton mutu tinggi pasta sebagai matriks adalah suatu faktor yang penting dalam mendesain (Harun Alrasyid, 2016). Untuk masalah perilaku pada beton mutu tinggi dan beton mutu biasa terletak pada beton mutu tinggi mempunyai diagram tegangan regangan yang lebih linear dibanding beton mutu biasa. Regangan pada saat kekuatan tekan maksimum akan naik seiring dengan kekuatannya, tetapi perilaku beton mutu tinggi pada diagram tegangan-regangan akan menunjukkan nilai yang lebih curam jika dibandingkan dengan beton mutu normal

2.2.2 Tulangan Mutu Tinggi

2.2.2.1 Tulangan Mutu Tinggi di Jepang dan Taiwan

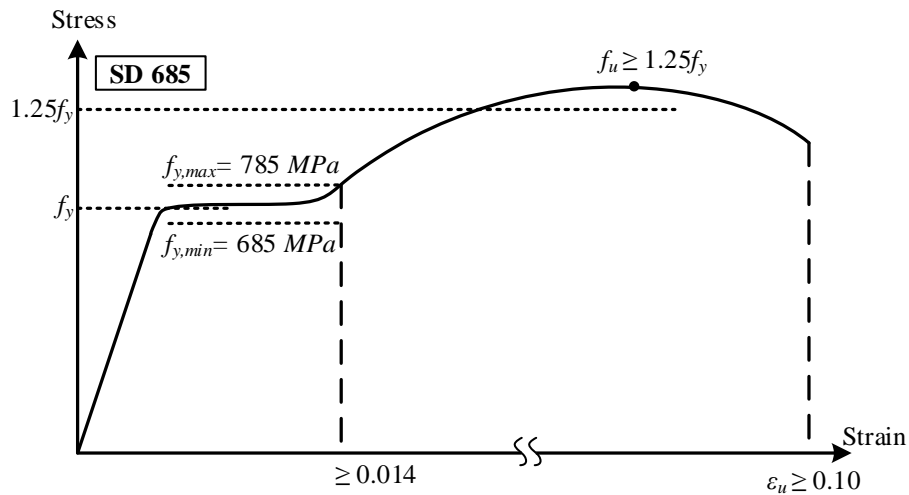
Pada tahun 1988-1995, Jepang memaparkan tentang “New RC Project untuk dipelajari dalam aplikasi beton mutu tinggi dan tulangan mutu tinggi pada gaya gempa. Meskipun tulangan mutu tinggi sudah ditetapkan sebagai bagian dari “New RC Construction standart” dari Ministry of Construction, tetapi tulangan mutu tinggi belum diterima oleh Japanese Industrial Standart (JIS) (Miyajima, 2010; Nishiyama 2009).

Pada tahun 1970-an sampai dengan 1980-an, Taiwan menggunakan tulangan dengan kuat leleh sebesar 280 Mpa dan tulangan polos sebesar 240 Mpa dan 300 Mpa untuk tulangan utama pada konstruksi gedung. Mutu tulangan di Taiwan berkembang pada tahun 1990-an sampai dengan 2000-an dengan kuat leleh sebesar 420 Mpa dan 240 Mpa untuk tulangan utama (Lee, 2015). Taiwan Concrete Institute (TCI) melakukan penelitian yang menghasilkan sebuah beton baru bernama “New RC” yang akhirnya menghasilkan kuat leleh tulangan utama sebesar 685 Mpa dan kuat leleh tulangan sengkang sebesar 785 Mpa. (Lee, 2015) yang dapat dilihat pada Tabel 2.1. Di Jepang tulangan USD 685 dibagi menjadi dua yaitu USD685A dan USD685B, dimana tulangan USD 685A mempunyai ratio tarik lebih kecil dibandingkan USD 685B (Lee, 2015) dapat dilihat pada tabel 2.1. Pada

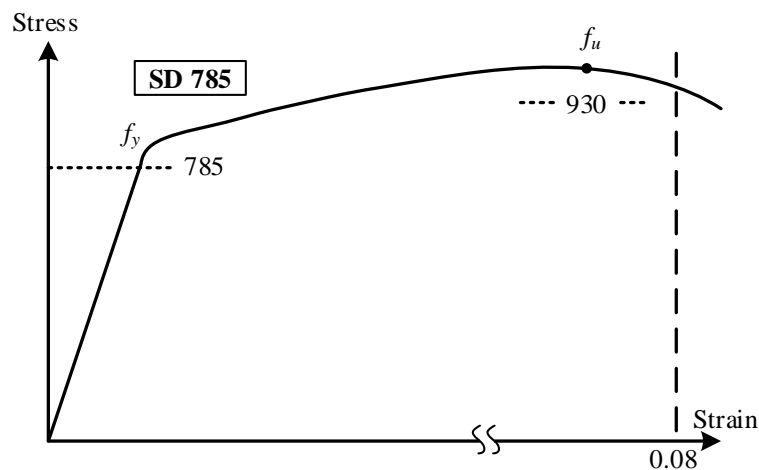
tahun 1988, Jepang juga memproduksi tulangan mutu tinggi yang mempunyai kuat leleh 658 Mpa dan 980 Mpa untuk tulangan longitudinal dan 785 Mpa dan 1275 Mpa untuk tulangan sengkang. (Nishiyama,2009) yang dapat dilihat pada tabel 2.1. Pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2 dapat dilihat hubungan tegangan regangan pada tulangan longitudinal dan transversal dengan mutu SD685 untuk tulangan longitudinal dan SD785 untuk tulangan transversal.

Tabel 2.1 Macam-macam tulangan USD685,USD785 dari Jepang dan SD685,SD785 dari Taiwan

| Grade | USD685 A | USD685 B | USD785 5 | SD685 | SD785 |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------|-------|
| Yield strength , MPa | 685-785 | 685-755 | ≥785 | 685-785 | ≥785 |
| Tensile strength, min MPa | - | - | 930 | 860 | 930 |
| Strain at yield plateau, min % | 1.4 | 1.4 | - | 1.4 | - |
| Total elongation, min % | 10 | 10 | 8 | 10 | 8 |
| Ratio Tensile to Yield strength min | 1.18 | 1.25 | - | 1.25 | - |



Gambar 2.1 Tulangan SD685 untuk tulangan longitudinal



Gambar 2.2 Tulangan SD785 untuk tulangan transversal

2.2.2.2 Tulangan Mutu Tinggi di Negara Lain

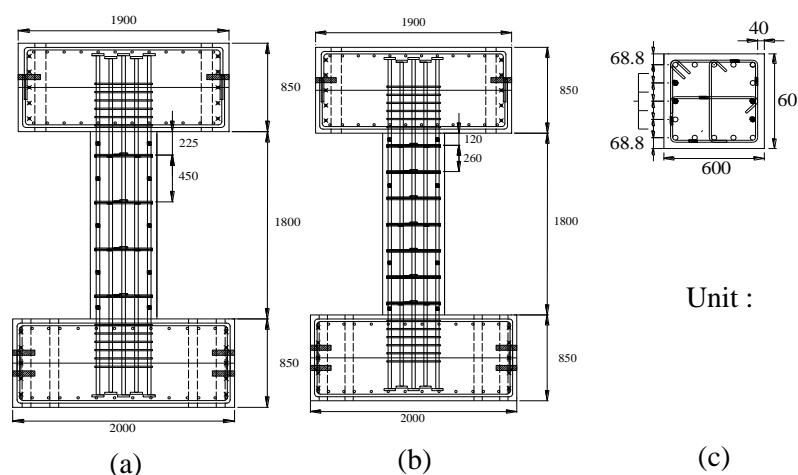
Terdapat beberapa tipe tulangan mutu tinggi yang dapat digunakan di negara lain yaitu Amerika Serikat, New Zealand dan Australia. Di Negara-negara tersebut memproduksi tulangan dengan mempunyai kuat tekan leleh baja sebesar 500 Mpa. Di New Zealand dan Australia memproduksi 2 macam kelas tulangan, yaitu 500E dan 500N. Pada tulangan dengan kelas 500E dikhususkan untuk rangka yang memikul gempa, sedangkan untuk Kelas 500N diperuntukan untuk struktur yang tidak memerlukan daktilita yang besar (Caldarone, 2008).

2.3 Eksperimental yang Telah Dilakukan

2.3.1 Penelitian Ou dan Kurniawan (2015)

Ou dan Kurniawan melakukan pengujian eksperimental pada empat titik kegagalan geser kolom mutu tinggi. Program percobaan terdiri dari 16 kolom kurvatur ganda dengan dimensi 600 mm x 600 mm dan tinggi bersih 1800 mm. Kolom yang diperkuat dengan tulangan longitudinal mutu tinggi D32 (# 10) SD685 dan D13 (# 4) SD785 untuk tulangan transversal mutu tinggi. Kuat tekan yang diberikan sebesar 70 MPa dan 100 MPa. Empat tingkat rasio tekan aksial yang diamati diantaranya 10% (Seri-A), 20% (Seri-B), 30% (Seri-C) dan 40% (Seri-D). Kolom yang diuji tercantum dalam Tabel 2.2, sementara bentuk, ukuran dan potongan dari kolom ditunjukkan pada Gambar 2.3.

Hasil eksperimental dari 8 kolom mutu tinggi menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan gaya tekan aksial dari $0,1 f_c' A_g$ sampai $0,4 f_c' A_g$, pola retak geser secara bertahap berubah dari retakan lentur-geser ke retakan web-geser dari kolom tersebut dengan sudut retak diagonal rata-rata pada perubahan kondisi akhir dari 33-15 derajat. Kolom-kolomnya mengalami kegagalan pada drift yang sama sebagai retak diagonal.



Gambar 2.3 Desain Spesimen: (a) spesimen A-1,A-2,B-1,B-2,C-1,C-2,D-1,D-2; (b) specimen A3,A-4,B-3,B-4,C-3,C-4,D-3,D-4. (Ou and Kurniawan 2015)

Tabel 2.2 Macam-macam tulangan USD685,USD785 dari jepang dan SD685,SD785 dari Taiwan

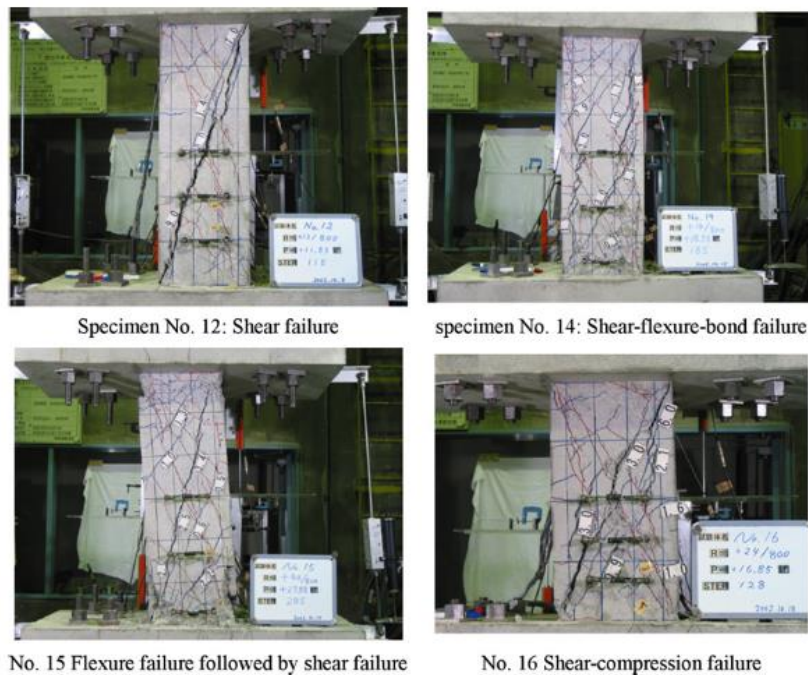
| Kolom | f'_c (MPa) | Kondisi Retak | | | | |
|-------|-----------------|-----------------------|------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| | | Rasio Drift (%) | σ_{st} , MPA | V_{test} , kN | $V_{s,test}$, kN | $V_{c,test}$, kN |
| A-1 | 92.5 | 0.35 | 243 | 1578 | 150 | 1428 |
| A-2 | 99.99 | 0.33 | 235 | 1638 | 150 | 1488 |
| A-3 | 96.9 | 0.32 | 359 | 1772 | 413 | 1359 |
| A-4 | 107.1 | 0.33 | 418 | 1781 | 447 | 1334 |
| B-1 | 108.3 | 0.45 | 223 | 2078 | 165 | 1913 |
| B-2 | 125 | 0.41 | 183 | 2298 | 195 | 2103 |
| B-3 | 112.9 | 0.4 | 214 | 2418 | 411 | 2007 |
| B-4 | 121 | 0.42 | 380 | 2528 | 522 | 2006 |
| C-1 | 104.1 | 0.42 | 28 | 2036 | 45 | 1991 |
| C-2 | 138.8 | 0.6 | 28 | 2958 | 39 | 2919 |
| C-3 | 104.6 | 0.38 | 602 | 2210 | 1140 | 1070 |
| C-4 | 130 | 0.62 | 32 | 3018 | 68 | 2950 |
| D-1 | 101 | 0.37 | 30 | 2239 | 46 | 2193 |
| D-2 | 125.5 | 0.46 | 24 | 2486 | 36 | 2450 |
| D-3 | 106.4 | 0.45 | 32 | 2355 | 77 | 2278 |
| D-4 | 127.8 | 0.44 | 38 | 2547 | 92 | 2455 |

σ_{st} : tulangan tegangan geser; V_{test} : kuat geser eksperimental; $V_{s,test}$:
kuat geser eksperimental disediakan oleh tulangan geser; $V_{c,test}$: kuat
geser eksperimental disediakan

2.3.2 Penelitian Mostafaei, Vecchio, and Kabeyasawa (2005-2008)

Berdasarkan hasil eksperimen, spesimen No. 12 yang ditunjukkan pada Gambar 2.4, dengan rasio tulangan transversal terendah, gagal dalam geser dengan celah geser dominan jelas terlihat di permukaannya. Respon lentur diperlihatkan oleh spesimen No. 15 dengan drift ratio sekitar 3,5%, diikuti oleh kegagalan geser.

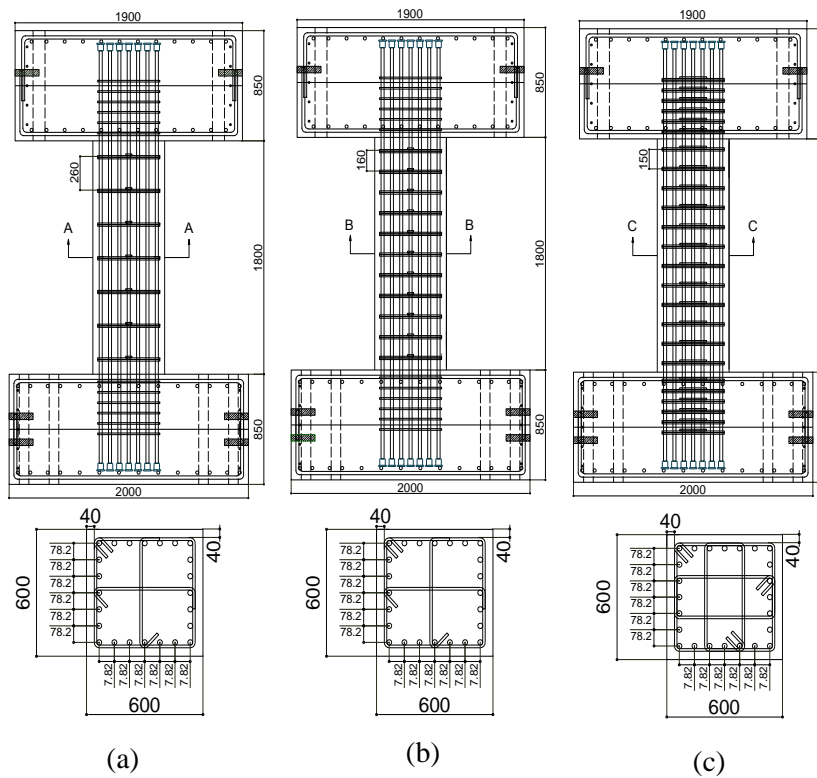
Kolom Nomor 14 pertama gagal pada *bond-flexure* dan kemudian menunjukkan geser dan terjadinya retak pada permukaannya. Sementara untuk kolom Nomor 16 yang ditunjukkan pada Gambar 2.4, spesimen terpendek, gagal dalam geser-tekan sebelum mencapai kapasitas beban lentur. Gambar 2.4 menggambarkan pola retak dan kegagalan untuk spesimen No. 12 ke No. 15 secara cepat setelah kegagalan geser pada pasca-puncak. Dapat dilihat pada Tabel 2.3 menunjukkan perbandingan hasil eksperimen dan analitis



Gambar 2.4 Pola retak dan Mode Kegagalan Kolom (Mostafei et al, 2008)

2.3.3 Penelitian Harun Alrasyid (2016)

Harun Alrasyid (2016) melakukan eksperimen terhadap 9 kolom beton bertulang mutu tinggi dibawah kombinasi beban siklik dan beban tekan aksial konstan dengan menggunakan mutu beton 70 MPa, mutu baja tulangan longitudinal (SD685) dan tulangan transversal (SD785). Semua kolom akan mengalami kegagalan akibat geser sebelum terjadiya kegagalan akibat lentur. Hasil eksperimen, bentuk dan ukuran kolom dapat dilihat pada Tabel 2.4 dan Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Desain Spesimen: (a) spesimen A-3.1, B-3.1; (b) spesimen B-5, C-5, D-5; (c) spesimen A-6, B-6, C-6, D-6 (Harun Alrasyid 2015).

Tabel 2.3 Pengaplikasian beban kolom pada retak diagonal dan kondisi ultimate.

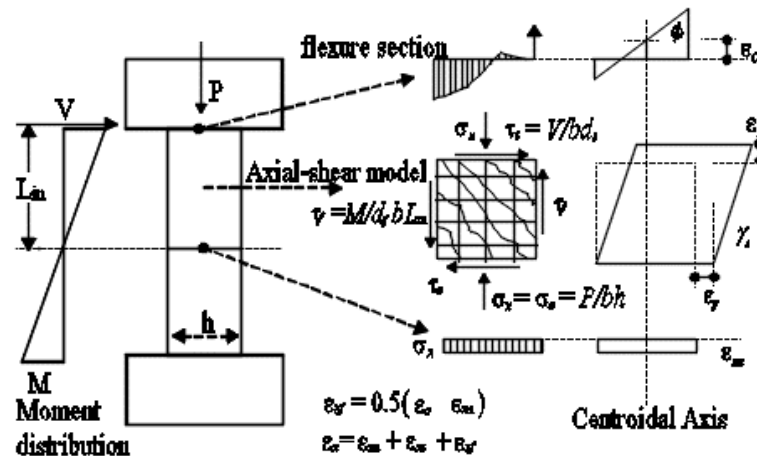
| Kolom | f'_c (Mpa) | ρ_w (%) | $P/A_g f'_c$ | Kondisi Retak Diagonal* | | Kondisi Ultimate [†] | |
|-------|-----------------|-----------------|--------------|----------------------------|------------|-------------------------------|------------|
| | | | | Aktual (Nominal) | V_{test} | Aktual (Nominal) | V_{test} |
| | | | | Drift (%) | (kN) | Drift (%) | (kN) |
| A-3.1 | 92.2 | 0.26 | 0.1 | 0.37(0.50) | 1348 | 0.84(1.00) | 1817 |
| A-6 | 90.8 | 0.59 | | 0.35(0.50) | 1336 | 1.82(2.00) | 2480 |
| B-3.1 | 78.0 | 0.26 | 0.2 | 0.52(0.75) | 1999 | 0.52(0.75) | 1999 |
| B-5 | 78.0 | 0.41 | | 0.48(0.75) | 1770 | 0.68(1.00) | 2195 |
| B-6 | 101.1 | 0.59 | | 0.50(0.75) | 2167 | 1.19(1.50) | 2856 |
| C-5 | 79.6 | 0.41 | 0.3 | 0.48(0.75) | 2400 | 0.48(0.75) | 2400 |
| C-6 | 80.3 | 0.59 | | 0.64(1.00) | 2482 | 1.07(1.50) | 3039 |
| D-5 | 82.8 | 0.41 | 0.4 | 0.49(0.75) | 2560 | 0.49(0.75) | 2560 |
| D-6 | 84.9 | 0.59 | | 0.46(0.75) | 2383 | 0.70(1.00) | 2535 |

2.4 Uniaxial Shear Flexure Model

Metode ASFI membandingkan dari dua model: model lentur yang didapat dari analisis penampang uniaksial, dan model geser yang didapat dari elemen geser biaksial. Total drift lateral dari kolom antara 2 penampang didapat dari jumlah regangan geser(γ_s) dan ratio drift lentur (γ_f) antara dua penampang. Total regangan aksial (ϵ_x) didapat dari jumlah regangan axial yang didapat dari regangan aksial(ϵ_{xa}), regangan geser(ϵ_{xs}) dan mekanisme lentur(ϵ_{xf}).

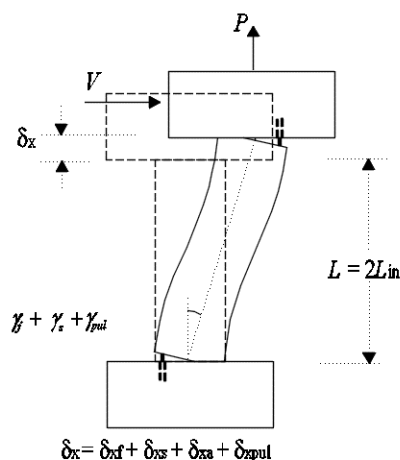
$$\gamma = \gamma_s + \gamma_f \quad (1)$$

$$\epsilon_x = \epsilon_{xs} + \epsilon_{xf} + \epsilon_{xa} \quad (2)$$



Gambar 2.6 Axial-shear-flexure interaction pada metode ASFI

Pada Gambar 2.6. Ada 2 titik tinjauan untuk kolom beton bertulang. Total deformasi aksial adalah jumlah dari total regangan aksial yang didapatkan dari penjumlahan efek aksial geser dan lentur.

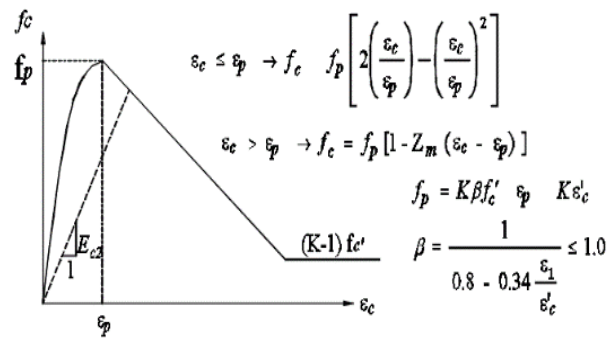


Gambar 2.7 Deformasi kolom Axial-shear-flexure pada metode ASFI

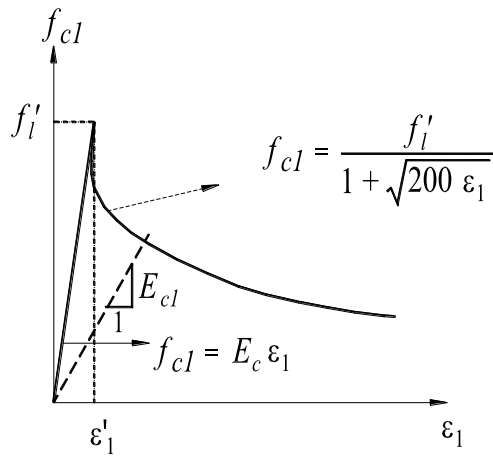
Pada Gambar 2.7. Total drift ratio didapat dari kombinasi antara geser, lentur dan deformasi pullout.

Metode kekakuan secant bisa diaplikasikan pada elemen beton dan elemen tulangan pada metode USFM. Terdapat constitutive law dan modulus secant yang didapat dari USFM. Untuk kombinasi model aksial lentur dan kombinasi model aksial geser digambarkan pada Gambar 2.8, 2.9, 2.10. Pada Gambar 2.9, Ada dua parameter

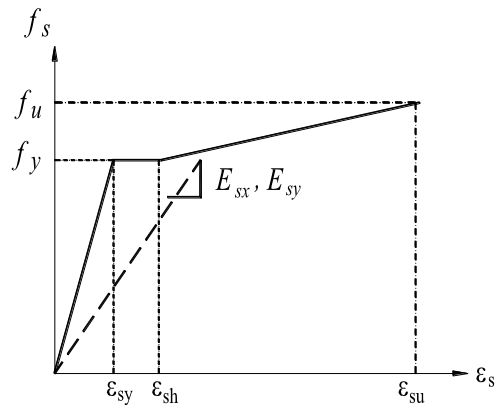
pada pengekanan. Parameter pengekanan tersebut adalah K dan Z_m . Parameter tersebut dapat dideskripsikan pada model Kent dan Park untuk hubungan regangan-tegangan dari pengekanan beton dengan sengkang kotak. Terdapat juga parameter β pada Gambar 2.8. β adalah compression softening faktor.



Gambar 2.8 Concrete compression constitutive law



Gambar 2.9 Concrete tensile constitutive law



Gambar 2.10 Constitutive law for reinforcing bars

$$K = 1 + \frac{\rho_{ww} f_{yy}}{f'_c}, Z_m = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.29 f'_c}{145 f'_c - 1000} + \frac{3}{4} \rho_{wy} \sqrt{\frac{h''}{s_h}} - K \varepsilon'_c} \quad (3)$$

Dimana (ρ_{ww}) adalah volume ratio dari sengkang kotak dibandingkan dengan volume inti beton yang diukur dari luar samapai permukaan sengkang, f_{yy} adalah tengangan leleh dari sengkang(Mpa), f'_c adalah kekuatan tekan silinder beton(Mpa), h'' adalah lebar beton inti yang diukur sampai dengan permukaan luar sengkang, s_h adalah jarak dari as sengkang ke sengkang, dan ε'_c adalah regangan tekan maksimum pada beton.

$$\beta = \frac{1}{0.8 - 0.34 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon'_c}} \leq 1.0 \quad (4)$$

dimana (ε'_c)=Regangan pada beton. Rata-rata regangan tarik pada beton ε_1 didekripsikan pada asumsi awal dan persamaan dasar pada MCFT.

Asumsi di metode USFM adalah untuk mendefinisikan nilai regangan tekan utama pada beton (ε_2), jadi hasilnya didapat dari dua titik tinjauan pada sebuah penampang (Nishiyama,2009).

$$\varepsilon_2 = 0.5(\varepsilon_{2i} + \varepsilon_{2i+1}) \quad (5)$$

Asumsi lain pada metode USFM adalah untuk mendapatkan nilai dari regangan pada colum dari dua titik peninjauan ε_x .

$$\varepsilon_x = 0.5(\varepsilon_{xi} + \varepsilon_{xi+1}) \quad (6)$$

Langkah berikutnya adalah mendapatkan regangan tarik utama pada beton f_{cI} . Pada metode Modified Compression Field Theory, ada dua persamaan kesetimbangan

$$f_{cx} = f_{cI} - \tau \cot \theta \quad (7)$$

$$f_{cy} = f_{cI} - \tau \tan \theta \quad (8)$$

Dimana f_{cx} and f_{cy} = Tegangan pada beton pada sumbu x (aksial) dan arah sumbu y (transversal); f_{cI} =Tegangan tarik utama pada beton; τ =tegangan geser pada beton; and θ =sudut retak. Dengan menggunakan persamaan kesetimbangan diatas, terdapat hubungan yang dapat dituliskan sebagai berikut

$$\tan^2 \theta = \frac{f_{c1} - f_{cy}}{f_{c1} - f_{cx}} \quad (9)$$

Nilai dari sudut retak didapatkan dengan rumus dibawah

$$\tan^2 \theta = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_2}{\varepsilon_y - \varepsilon_2} \quad (10)$$

Dimana ε_x = regangan aksial; ε_y = regangan pada tulangan transversal; and ε_2 = regangan tekan utama pada beton.. dengan mensubstitusi persamaan 9,10. Nilai dari regangan tarik utama pada beton ε_1 .

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_y - \varepsilon_2 \quad (11)$$

Untuk nilai ε_y , H. Mostafei mengasumsikan tulangan transversal leleh. Dan nilainya adalah 0.002

$$f_{cy} = -\rho_{sy} E_s \varepsilon_y \quad (12)$$

dimana ε_y = regangan ada tulangan transversal; E_s = modulus elastisitas pada tulangan transversal.

Terdapat batasan-batasan pada metode USFMjadi mekanisme geser tidak mempunya efek pada analisis penampang.

$$f_{c1} = \frac{f'_t}{1 + \sqrt{500\varepsilon_1}} \leq 0.56f'_t \quad (13)$$

Nilai dari f_{c1} antara 0.31 f'_t sampai 0.56 f'_t .

Pada saat retak terjadi pada elemen karena tegangan geser, ada batasan untuk tegangan geser menggunakan Walraven equation:

$$\tau_i = \frac{0.18\sqrt{f'_c}}{0.31 + \frac{24w}{ag + 16}} (Mpa, mm) \quad (14)$$

dimana $w = s_\theta \varepsilon_1$ and

$$S_\theta = \frac{1}{\frac{\sin \theta}{S_x} + \frac{\cos \theta}{S_y}} \quad (15)$$

Dimana S_x and S_y = jarak retak rata-rata di sumbu x dan y. Persyaratan di metode USFM adalah

$$\tau_{max} \leq \tau_i + f_{syy} \rho_{sy} \cot \theta \quad (16)$$

dimana f_{syy} = tegangan tulangan transversal pada kondisi retak

$$\tau_{\max} = \frac{M}{bhL_{in}} \quad (17)$$

Dimana M= momen di jepit dari kolom yang didapat dari analisi penampang. Saat menghitung perilaku dari kolom beton bertulang mutu tinggi, terdapat perbedaan perilaku antara hasil penelitian dan hasil dari analisis numerik, Diduga, perbedaan tersebut dikarenakan tulangan transversal belum leleh jika dibandingkan dengan analisis numerik yang menganggap tulang transversal telah leleh. Jadi terdapat sebuah modifikasi untuk memperhitungkan nilai tegangan leleh pada tulangan transversal yang terjadi untuk menjadi inputan dalam analisi numerik (Salim Razvi,1999)

$$f_s = E_s \left(0.0025 + 0.0043 \sqrt{\frac{k_2 \rho_c}{f'_{co}}} \right) \leq f_{yt} \quad (18)$$

dimana f'_{co} dalam satuan megapaskal, k_2 = koefisien yang mewakili efisiensi dari tulangan pengekangan, ρ_c =total tulangan yang arahnya di dua tegak lurus yang dibagi dengan area beton yang ditinjau, f_s = tegangan tarik pada tulangan transversal pada saat tegangan puncak pada beton, f_{yt} = tegangan leleh pada tulangan transversal. (Salim Razvi,1999)

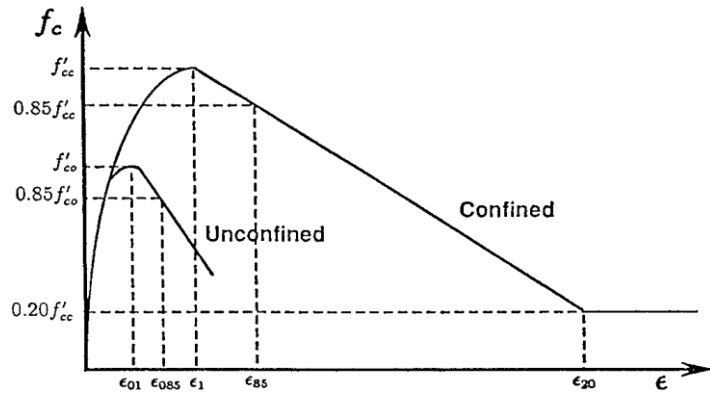
$$k_2 = 0.15 \sqrt{\left(\frac{b_c}{s} \right) \left(\frac{b_c}{s_1} \right)} \leq 1.0 \quad (19)$$

dimana b_c = lebar inti pada beton yang diukur dari tengah ke keliling sengkang, s =jarak dari tulangan transversal, s_1 =jarak dari tulangan longitudinal.

$$\rho_c = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{sx})_i + \sum_{j=1}^m (A_{sy})_j}{[s(b_{cx} + b_{cy})]} \quad (20)$$

dimana n and m = nomer dari kaki sengkang pada arah x dan y. A_{sx}, A_{sy} = Luas satu kaki tulangan transversal pada arah x dan y. B_{cx}, b_{cy} = lebar inti pada beton yang diukur dari tengah ke keliling sengkang pada arah x dan y.

Setelah kita mengetahui nilai dari f_s , Tegangan leleh pada tulangan transversal dapat diketahui pada kondisi leleh atau tidak. Pada Figure 6. Nilai pada f'_{cc} sama dengan nilai f_s , sehingga akan didapatkan hasil baru dengan memodifikasi nilai tegangan leleh pada tulangan transversal.



Gambar 2.11 Proposed Model

$$\varepsilon_{01} = 0.0028 - 0.0008k_3 \quad (21)$$

$$\varepsilon_{085} = \varepsilon_{01} + 0.0018k_3^2 \quad (22)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{01} + (1 + 5k_3K) \quad (23)$$

$$\varepsilon_{85} = 260k_3\rho_c\varepsilon_1[1 + 0.5k_2(k_4 - 1)] + \varepsilon_{085} \quad (24)$$

dimana,

$$k_3 = \frac{40}{f'_{co}} \leq 1.0 \quad (25)$$

$$k_4 = \frac{f_{yt}}{500} \geq 1.0 \quad (26)$$

$$K = \frac{k_1 f_{le}}{f'_{co}} \geq 1.0 \quad (27)$$

dimana,

$$k_1 = 6.7(f_{le})^{-0.17} \quad (28)$$

$$f_{le} = k_2 f_l \quad (29)$$

$$f_l = \frac{\sum_{i=1}^q (A_s f_s \sin \alpha)_i}{sb_c} \quad (30)$$

dimana ε_1 = regangan yang terjadi pada saat tegangan puncak dari beton terkekang,

ε_{01} = regangan yang terjadi pada saat tegangan puncak dari beton tidak terkekang,

ε_{85} = regangan yang terdaji pada saat mencapai 85% dari tegangan puncak pada

beton terkekang di grafik zona turun, $\varepsilon_{0.85}$ = regangan yang terdaji pada saat mencapai 85% dari tegangan puncak pada beton tidak terkekang di grafik zona turun, k_3 =koefisien karena efek dari kekuatan pada beton, k_4 =koefiseien karena kekuatan pada tulangan transversal, f_{le} =tekanan lateral , f_l =rata-rata tekanan lateral karena pengekangan.

Persamaan 21 sampai persamaan 30 digunakan untuk menggambar grafik yang diilustrasikan pada Figure 6. Terdapat dua kondisi pada grafik diatas, yang pertama adalah kruva pada konsidi naik dan yang kedua adalah kurva pada kondisi turun. Untuk kondisi kurva pada saat naik terdapat persamaan untuk mendapatkan tegangan yang terjadi pada beton.

$$f_c = \frac{f'_{cc} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1} \right)^r}{r - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1} \right)^r} \quad (31)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (32)$$

dimana E_{sec} =modulus secan dari elastisitas pada beton terkekang dan dapat dihitung pada persamaaan 33

$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_1} \quad (33)$$

dimana E_c = modulus elastisitas beton tak terkekang. Persamaan dibawah ini adalah untuk menghitung nilai E_c dengan melakukan percobaan, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut

$$E_c = 3320 \sqrt{f'_c} + 6900 \quad (34)$$

dimana f'_c pada satuan megapascal. Nilai E_c seharusnya lebih besar daripada E_{sec} . Untuk kurva pada kondisi turun, persasmaan untuk mendapatkan nilai tegangan adlaah sebagai berikut.

$$f_c = \frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_{85})}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{85})} 0.15 f'_{cc} + 0.85 f'_{cc} \quad (35)$$

Jadi dengan tegangan baru yang terjadi pada regangan tertentu, diharapkan hasil dari experimental mendekati hdengan hasil pada analis numerik

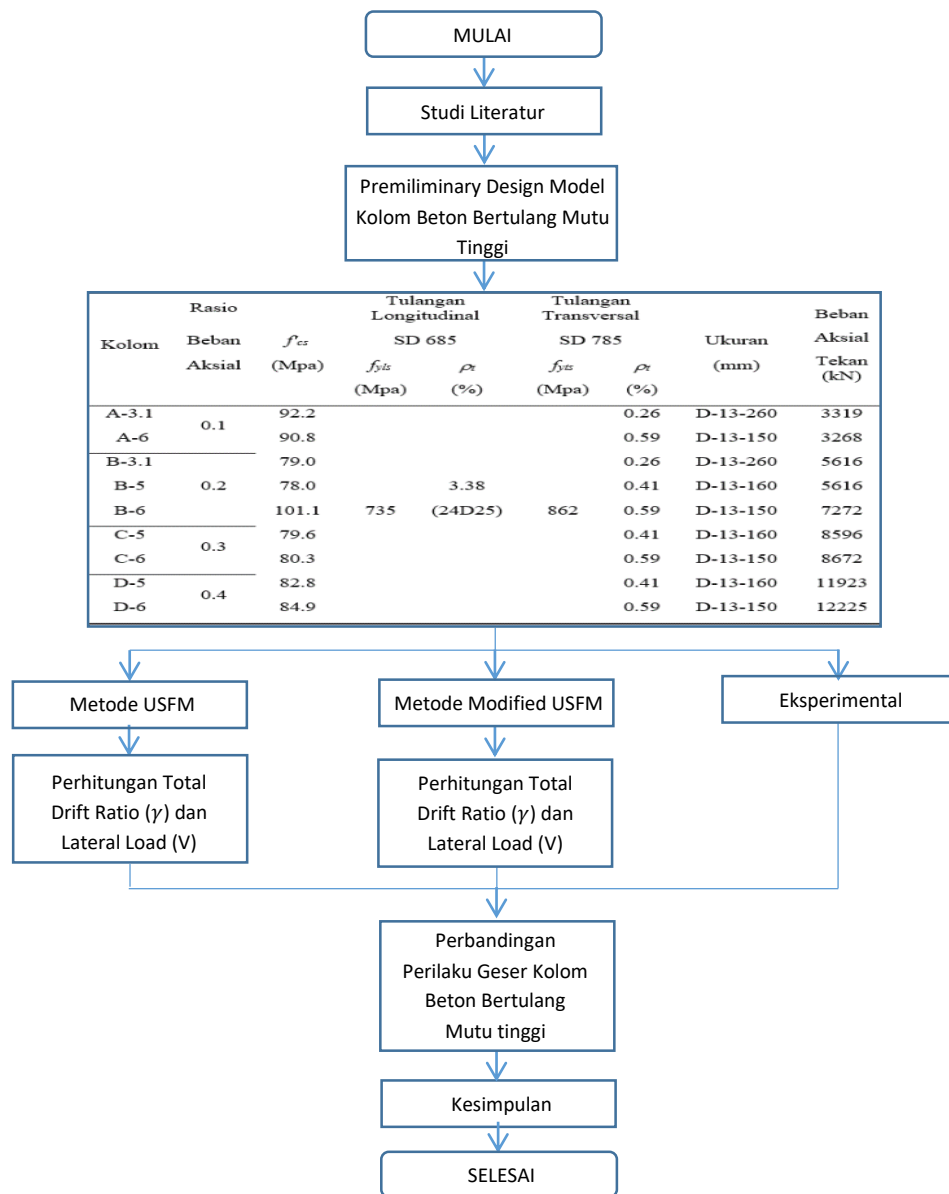
Pada journal ini akan dihitung 9 spesimen dari kolom beton bertulang mutu tinggi dengan analisi numerik yang dapat dilihat pada tabel 1. Ada beberapa parameter dalam tabel tersebut, parameternya adalah tipe dari kolom, ratio beban aksial, kekuatan tekan dari beton, kekuatan leleh pada tulangan transversal dan longitudinal, dan ukuran dari tulangan transversal maupun longitudinal. Terdapat 4 tipe berdasarkan ratio beban aksial, yaitu $0.1 P/A_g f_c$, $0.2 P/A_g f_c$, $0.3 P/A_g f_c$, $0.4 P/A_g f_c$. Pada Figure 7 ada 3 tipe berdasarkan desain spesimen dan perbedaannya terdapat pada jarak dan jumlah dari tulangan transversal. Gambar 7a untuk spesimen A-3.1, B-3.1, gambar 7b untuk spesimen B-5, C-5, D-5 dan Figure 7c untuk spesimen A -6, B-6, C-6, D-6. Hasil dari eksperimental akan dibandingkan dengan analisi numerik menggunakan metode USFM dan metode modifikasi USFM.

BAB III

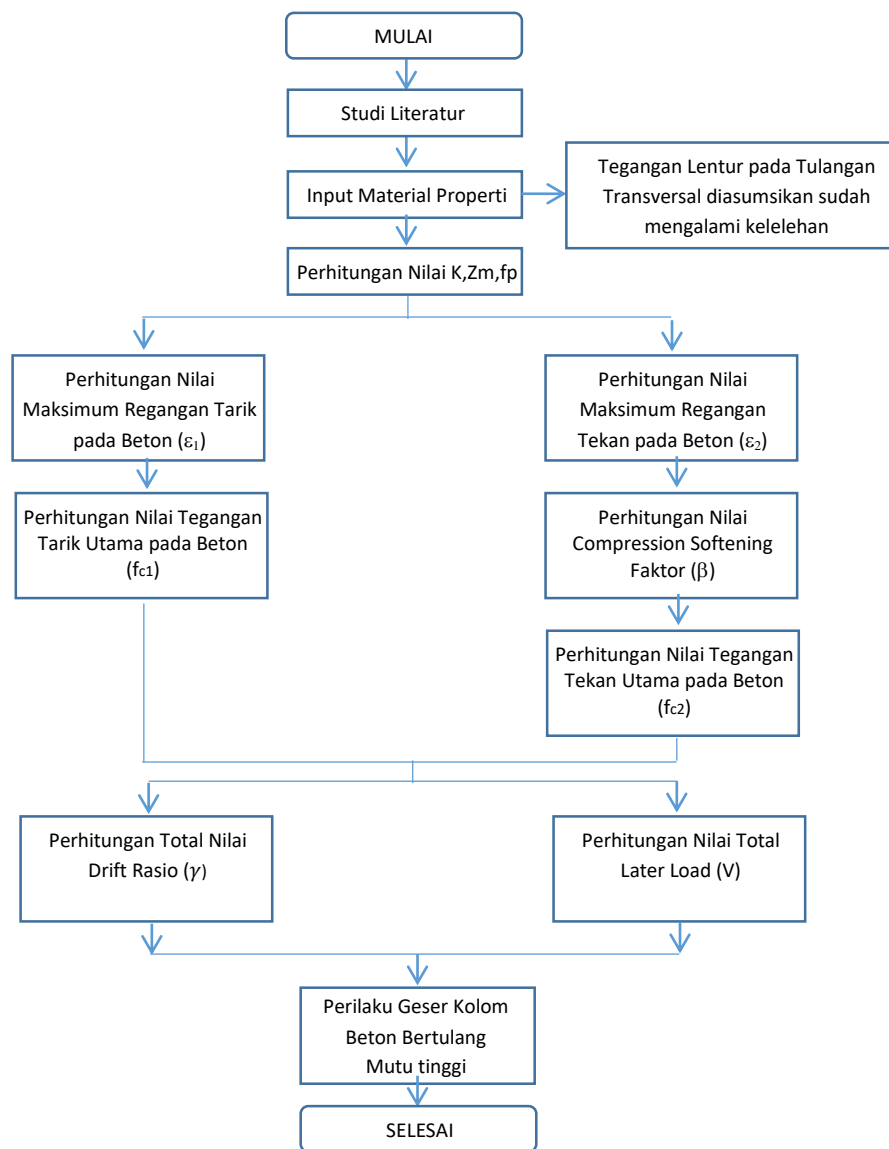
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Bagan Alir Penelitian

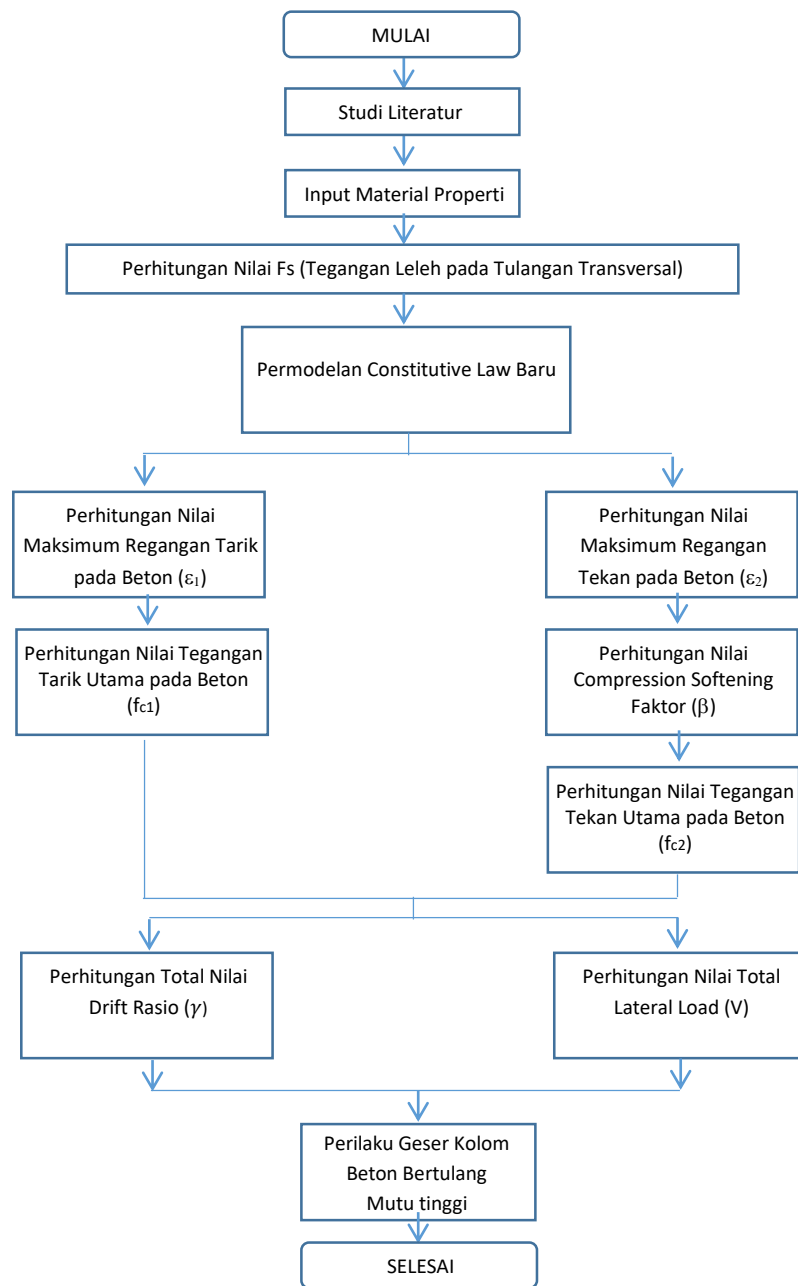
Didalam bab ini akan dijelaskan tentang aliran pekerjaan yang akan dikerjakan oleh penulis terkait evaluasi perilaku geser kolom beton bertulang mutu tinggi dengan menggunakan metode Uniaxial Shear Flexure Method (USFM). Diperlukan metode dan urutan kerja yang jelas untuk menyelesaikan penelitian ini. Bagan alir yang dihasilkan harus memenuhi kriteria berpikir logis dan kritis sehingga akan menghasilkan pekerjaan yang baik dan efektif. Bagan alir yang dimaksudkan dapat dilihat pada Gambar 3.1 sampai dengan Gambar 3.3



Gambar 3.1 Bagan Alir Perbandingan Metode USFM, Metode Modified USFM dan Eksperimental



Gambar 3.2 Bagan Alir Metode USFM



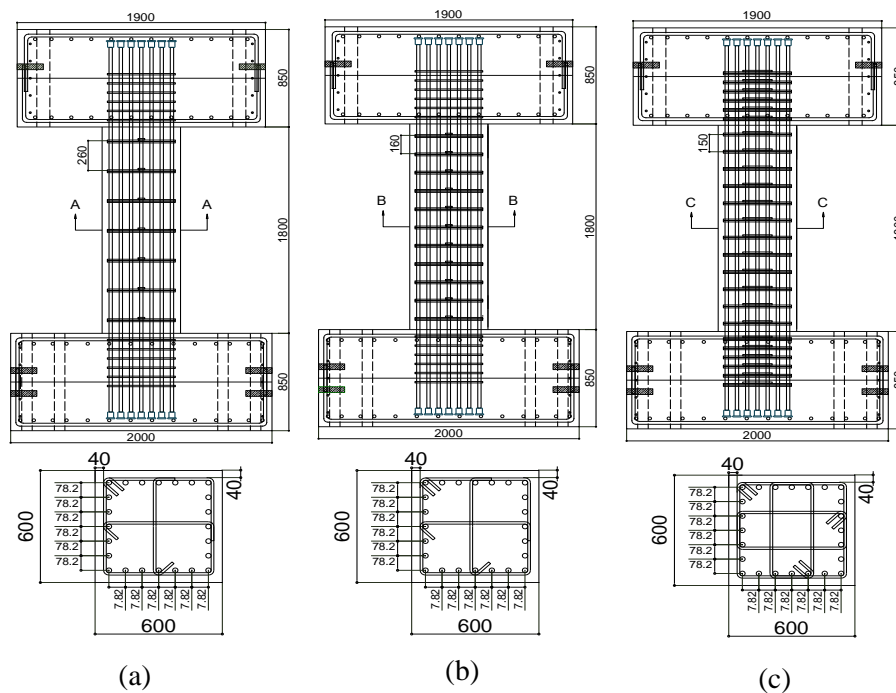
Gambar 3.3 Bagan Alir Metode Modified USFM

3.2 Studi Literatur

Pada studi literatur ini akan dilakukan pengumpulan data-data, rumus-rumus yang digunakan serta asumsi-asumsi yang dapat digunakan untuk menunjang pengetahuan penulis terhadap penelitian yang akan dilakukan. Pada tahap ini akan ditinjau perilaku kolom beton bertulang dengan memperhitungan kegagalan akibat aksial, geser dan lentur. Penulis juga akan membaca eksperimental-eksperimental yang sudah dilakukan terkait kegagalan kolom yang nantinya akan dibandingkan dengan menggunakan perhitungan analisis penampang.

3.3 Preliminary Design Model Kolom Beton Bertulang Mutu Tinggi

Terdapat 9 spesimen kolom beton bertulang yang akan dianalisa secara numerik dengan menggunakan Metode USFM dan Metode Modified USFM. Kolom-kolom tersebut diklasifikasikan menjadi 4 rasio beban aksial ($P/A_g f'_c$), 10% (kolom seri A) yakni spesimen kolom A-3.1 dan A-6, 20% (kolom seri B) yaitu untuk spesimen kolom B-3.1, B-5, dan B-6, 30% (kolom seri C) yakni untuk spesimen kolom C-5 dan C-6, serta 40% (kolom seri D), yaitu untuk spesimen kolom D-5 dan D-6. Sementara untuk rasio tulangan geser, dikelompokkan dalam 3 tingkatan yaitu 0.26%, 0.41% dan 0.59% dengan jarak spasi untuk masing-masing tulangan geser adalah 260 mm untuk spesimen kolom A-3.1 dan B-3.1, 160 mm untuk spesimen kolom B-5, C-5, dan D-5, dan jarak spasi 150 mm untuk spesimen kolom B-6, C-6, dan D-6.



Gambar 3.4 Desain Spesimen: (a) spesimen A-3.1, B-3.1; (b) spesimen B-5, C-5, D-5; (c) spesimen A-6, B-6, C-6, D-6

3.4 Metode USFM

3.4.1 Penginputan Material Properti

Pada Proses ini akan diinputkan Material Properti yang didapat dari data eksperimental yang telah dilakukan. Input Material ini terdiri dari ; Dimensi kolom, Rasio beban aksial, Tegangan tekan pada beton yang terjadi, Mutu tulangan longitudinal, Mutu tulangan transversal, Ukuran tulangan yang dipakai untuk tulangan transversal dan tulangan longitudinal, Jarak sengkang dan Jumlah kaki sengkang yang dipasang. Untuk tulangan transversal diasumsikan mengalami kelelahan.

3.4.2 Perhitungan nilai K, Zm, Fp

Pada proses ini akan dihitung nilai K, Zm dan fp. Tujuan dari perhitungan ini adalah untuk mendapatkan grafik dari Constitutive law yang digunakan dalam metode USFM (Uniaxial Shear Fleuxre Method).

Untuk mendapatkan nilai K dan Zm didapatkan dengan menggunakan

$$K = 1 + \frac{\rho_{ww} f_{yy}}{f_c'}, Z_m = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.29 f_c'}{145 f_c' - 1000} + \frac{3}{4} \rho_{wy} \sqrt{\frac{h''}{s_h}} - K \varepsilon_c'} \quad (36)$$

Dimana (ρ_{ww}) adalah volume ratio dari sengkang kotak dibandingkan dengan volume inti beton yang diukur dari luar samapai permukaan sengkang, f_{yy} adalah tengangan leleh dari sengkang(Mpa), f_c' adalah kekuatan tekan silinder beton(Mpa), h'' adalah lebar beton inti yang diukur sampai dengan permukaan luar sengkang, s_h adalah jarak dari as sengkang ke sengkang, dan ε_c' adalah regangan tekan maksimum pada beton.

Untuk mendapatkan nilai f_p didapatkan dengan menggunakan

$$f_p = \left(1 + \frac{\rho_{ww} \times f_{yy}}{f_c'} \right) \times f_c \quad (37)$$

Sehingga setelah mendapatkan nilai K, Zm dan f_p kita dapat menghitung nilai tegangan beton yang terjadi pada model kita melalui Constitutive Law yang dipakai pada metode USFM yang dapat dilihat pada Gambar 2.8.

3.4.3 Perhitungan Nilai Maksimum Regangan Tarik pada Beton (ε_1)

Nilai regangan tarik utama pada beton didapatkan dengan menggunakan asumsi dasar pada perhitungan USFM yaitu:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_y - \varepsilon_2 \quad (38)$$

Dimana ε_x = regangan aksial; ε_y = regangan pada tulangan transversal; and ε_2 = regangan tekan utama pada beton..

Untuk nilai ε_y , H. Mostafei mengasumsikan tulangan transversal leleh. Dan nilainya adalah 0.002

3.4.4 Perhitungan Nilai Maksimum Regangan Tekan pada Beton (ε_2)

Nilai regangan tarik tekan pada beton didapatkan dengan menggunakan rumus yaitu:

$$\varepsilon_2 = 0.5(\varepsilon_{2i} + \varepsilon_{2i+1}) \quad (38)$$

Pada rumus 38, dapat dilihat nilai regangan tarik utama pada beton didapatkan dari rata-rata regangan tarik pada beton yang diambil pada 2 titik tinjauan, titik tinjauan pertama dicari pada ujung kolom beton bertulang, sedangkan untuk titik tinjauan kedua didapatkan dari nilai regangan beton pada tengah bentang.

3.4.5 Perhitungan Tegangan Tarik Utama pada Beton (f_{c1})

Nilai tegangan tarik utama pada beton didapatkan dengan menggunakan rumus :

$$f_{c1} = \frac{f'_t}{1 + \sqrt{500\varepsilon_1}} \leq 0.56f'_t \quad (39)$$

Nilai dari f_{c1} antara $0.31 f'_t$ sampai $0.56 f'_t$. Nilai f'_t didapatkan dengan menggunakan rumus:

$$f'_t = \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} \quad (40)$$

3.4.6 Perhitungan Nilai Compression Softening Faktor (β)

Compression softening faktor (β) adalah faktor yang ditimbulkan karena interaksi geser yang terjadi pada beton saat mengalami kegagalan geser. Nilai Compression Softening Faktor ini didapatkan dengan menggunakan rumus:

$$\beta = \frac{1}{0.8 - 0.34 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon'_c}} \leq 1.0 \quad (41)$$

dimana (ε'_c)=Regangan pada beton yaitu 0.002

3.4.7 Perhitungan Tegangan Tekan Utama pada Beton (f_{c2})

Nilai tegangan tekan utama pada beton didapatkan dengan menggunakan Constitutive Law pada metode USFM. Terdapat dua kondisi pada gambar 2.8, yaitu dimana nilai regangan tekan utama pada beton sebelum mencapai nilai tegangan tekan beton terkekang dan dimana nilai regangan tekan utama pada beton melampaui nilai tegangan tekan beton terkekang.

3.4.8 Perhitungan Total Nilai Drift Ratio (γ)

Perhitungan total nilai drift ratio ini didapatkan dari perjumlah drift rasio diakibatkan oleh aksial-lentur (γ_f) dan drift rasio diakibatkan oleh aksial-geser

(γ_f). Untuk menghitung nilai drift ratio yang diakibatkan oleh aksial-lentur didapatkan dengan menggunakan momen curvature, sedangkan untuk menghitung nilai drift rasio yang diakibatkan oleh aksial-geser didapatkan dengan menggunakan metode Uniaxial Shear Flexure Method (USFM). Setelah mendapatkan nilai drift rasio akibat aksial-lentur dan nilai drift rasio akibat aksial-geser, Total nilai drift rasio didapatkan dari penjumlahan drift rasio akibat aksial-lentur dan nilai drift rasio akibat aksial-geser.

3.4.9 Perhitungan Nilai Lateral Load

Perhitungan Nilai Lateral Load didapatkan dengan menjumlah nilai lateral load akibat aksial-geser dan nilai lateral load akibat aksial-lentur.

3.4.10 Perilaku Geser Kolom Beton Bertulang Mutu Tinggi

Setelah kita mendapatkan total nilai drift rasio (γ) dan nilai lateral load (V), kita dapat melihat perilaku geser kolom beton bertulang mutu tinggi pada 9 spesimen kolom yang telah dilakukan uji eksperimen untuk mendapatkan perilaku geser kolom bertulang mutu tinggi.

3.5 Metode Modified USFM

3.5.1 Penginputan Material Properti

Pada Proses ini akan diinputkan Material Properti yang didapat dari data eksperimen yang telah dilakukan. Input Material ini terdiri dari ; Dimensi kolom, Rasio beban aksial, Tegangan tekan pada beton yang terjadi, Mutu tulangan longitudinal, Mutu tulangan transversal, Ukuran tulangan yang dipakai untuk tulangan transversal dan tulangan longitudinal, Jarak sengkang dan Jumlah kaki sengkang yang dipasang. Untuk tulangan transversal diasumsikan mengalami kelelahan.

3.5.2 Perhitungan nilai F_s (Tegangan Leleh pada Tulangan Transversal)

Pada proses perhitungan nilai f_s diharapkan perhitungan analisa numerik yang nantinya akan didapatkan dapat mendekati dengan hasil eksperimen dikarenakan nilai tegangan leleh pada tulangan transversal tidak diasumsikan leleh, melainkan dihitung dengan menggunakan perumusan sebagai berikut:

$$f_s = E_s \left(0.0025 + 0.0043 \sqrt{\frac{k_2 \rho_c}{f'_{co}}} \right) \leq f_{yt} \quad (42)$$

dimana f'_{co} dalam satuan megapaskal, k_2 = koefisien yang mewakili efisiensi dari tulangan pengekangan, ρ_c =total tulangan yang arahnya di dua tegak lurus yang dibagi dengan area beton yang ditinjau, f_s = tegangan tarik pada tulangan transversal pada saat tegangan puncak pada beton, f_{yt} = tegangan leleh pada tulangan transversal.[10]

$$k_2 = 0.15 \sqrt{\left(\frac{b_c}{s} \right) \left(\frac{b_c}{s_1} \right)} \leq 1.0 \quad (43)$$

dimana b_c = lebar inti pada beton yang diukur dari tengah ke keliling sengkang, s =jarak dari tulangan transversal, s_1 =jarak dari tulangan longitudinal.

$$\rho_c = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{sx})_i + \sum_{j=1}^n (A_{sy})_j}{[s(b_{cx} + b_{cy})]} \quad (44)$$

dimana n and m = nomer dari kaki sengkang pada arah x dan y . A_{sx}, A_{sy} = Luas satu kaki tulangan transversal pada arah x dan y . B_{cx}, b_{cy} = lebar inti pada beton yang diukur dari tengah ke keliling sengkang pada arah x dan y .

3.5.3 Perhitungan Constitutive Law Baru

Setelah kita mengetahui nilai dari f_s , Tegangan leleh pada tulangan transversal dapat diketahui pada kondisi leleh atau tidak. Pada gambar 2.11 . Nilai pada f'_{cc} sama dengan nilai f_s , sehingga akan didapatkan hasil baru dengan memodifikasi nilai tegangan leleh pada tulangan transversal.

$$\varepsilon_{01} = 0.0028 - 0.0008k_3 \quad (45)$$

$$\varepsilon_{085} = \varepsilon_{01} + 0.0018k_3^2 \quad (46)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{01} + (1 + 5k_3K) \quad (47)$$

$$\varepsilon_{85} = 260k_3\rho_c\varepsilon_1[1 + 0.5k_2(k_4 - 1)] + \varepsilon_{085} \quad (48)$$

dimana,

$$k_3 = \frac{40}{f'_{co}} \leq 1.0 \quad (49)$$

$$k_4 = \frac{f_{yt}}{500} \geq 1.0 \quad (50)$$

$$K = \frac{k_1 f_{le}}{f'_{co}} \geq 1.0 \quad (51)$$

dimana,

$$k_1 = 6.7(f_{le})^{-0.17} \quad (52)$$

$$f_{le} = k_2 f_l \quad (53)$$

$$f_l = \frac{\sum_{i=1}^q (A_s f_s \sin \alpha)_i}{sb_c} \quad (54)$$

dimana ε_1 = regangan yang terjadi pada saat tegangan puncak dari beton terkekang, ε_{01} = regangan yang terjadi pada saat tegangan puncak dari beton tidak terkekang, ε_{85} = regangan yang terdaji pada saat mencapai 85% dari tegangan puncak pada beton terkekang di grafik zona turun, ε_{085} = regangan yang terdaji pada saat mencapai 85% dari tegangan puncak pada beton tidak terkekang di grafik zona turun, k_3 =koefisien karena efek dari kekuatan pada beton, k_4 =koefiseien karena kekuatan pada tulangan transversal, f_{le} =tekanan lateral, f_l =rata-rata tekanan lateral karena pengekangan.

Persamaan 21 sampai persamaan 30 digunakan untuk menggambar grafik yang diilustrasikan pada Figure 6. Terdapat dua kondisi pada grafik diatas, yang pertama adalah kruva pada konsidi naik dan yang kedua adalah kurva pada kondisi turun. Untuk kondisi kurva pada saat naik terdapat persamaan untuk mendapatkan tegangan yang terjadi pada beton.

$$f_c = \frac{f'_{cc} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1} \right)^r}{r - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1} \right)^r} \quad (55)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (56)$$

dimana E_{sec} =modulus secan dari elastisitas pada beton terkekang dan dapat dihitung pada persamaaan 33

$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_1} \quad (57)$$

dimana E_c = modulus elastisitas beton tak terkekang. Persamaan dibawah ini adalah untuk menghitung nilai E_c dengan melakukan percobaan, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut

$$E_c = 3320 \sqrt{f'_c} + 6900 \quad (58)$$

dimana f'_c pada satuan megapascal. Nilai E_c seharusnya lebih besar daripada E_{sec} . Untuk kurva pada kondisi turun, persamaan untuk mendapatkan nilai tegangan adalah sebagai berikut.

$$f_c = \frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_{85})}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{85})} 0.15 f'_{cc} + 0.85 f'_{cc} \quad (59)$$

3.5.4 Perhitungan Nilai Maksimum Regangan Tarik pada Beton (ε_1)

Nilai regangan tarik utama pada beton didapatkan dengan menggunakan asumsi dasar pada perhitungan USFM yaitu:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_y - \varepsilon_2 \quad (60)$$

Dimana ε_x = regangan aksial; ε_y = regangan pada tulangan transversal; and ε_2 = regangan tekan utama pada beton..

3.5.5 Perhitungan Nilai Maksimum Regangan Tekan pada Beton (ε_2)

Nilai regangan tarik tekan pada beton didapatkan dengan menggunakan rumus yaitu:

$$\varepsilon_2 = 0.5(\varepsilon_{2i} + \varepsilon_{2i+1}) \quad (61)$$

Pada rumus 61, dapat dilihat nilai regangan tarik utama pada beton didapatkan dari rata-rata regangan tarik pada beton yang diambil pada 2 titik tinjauan, titik tinjauan pertama dicari pada ujung kolom beton bertulang, sedangkan untuk titik tinjauan kedua didapatkan dari nilai regangan beton pada tengah bentang.

3.5.6 Perhitungan Tegangan Tarik Utama pada Beton (f_{c1})

Nilai tegangan tarik utama pada beton didapatkan dengan menggunakan rumus :

$$f_{c1} = \frac{f'_t}{1 + \sqrt{500\varepsilon_1}} \leq 0.56 f'_t \quad (39)$$

Nilai dari f_{cl} antara $0.31 f'_t$ sampai $0.56 f'_t$. Nilai f'_t didapatkan dengan menggunakan rumus:

$$f'_t = \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} \quad (40)$$

3.5.7 Perhitungan Tegangan Tekan Utama pada Beton (f_{c2})

Nilai tegangan tekan utama pada beton didapatkan dengan menggunakan Constitutive Law baru pada gambar 2.11. Terdapat dua kondisi pada gambar 2.11, yaitu dimana nilai regangan tekan utama pada beton sebelum mencapai nilai tegangan tekan beton terkekang dan dimana nilai regangan tekan utama pada beton melampaui nilai tegangan tekan beton terkekang.

3.5.8 Perhitungan Total Nilai Drift Ratio (γ)

Perhitungan total nilai drift ratio ini didapatkan dari perjumlahan drift ratio diakibatkan oleh aksial-lentur (γ_f) dan drift ratio diakibatkan oleh aksial-geser (γ_s). Untuk menghitung nilai drift ratio yang diakibatkan oleh aksial-lentur didapatkan dengan menggunakan momen curvature, sedangkan untuk menghitung nilai drift ratio yang diakibatkan oleh aksial-geser didapatkan dengan menggunakan metode Uniaxial Shear Flexure Method (USFM). Setelah mendapatkan nilai drift ratio akibat aksial-lentur dan nilai drift ratio akibat aksial-geser, Total nilai drift ratio didapatkan dari penjumlahan drift ratio akibat aksial-lentur dan nilai drift ratio akibat aksial-geser.

3.5.9 Perhitungan Nilai Lateral Load

Perhitungan Nilai Lateral Load didapatkan dengan menjumlah nilai lateral load akibat aksial-geser dan nilai lateral load akibat aksial-lentur.

3.5.10 Perilaku Geser Kolom Beton Bertulang Mutu Tinggi

Setelah kita mendapatkan total nilai drift ratio (γ) dan nilai lateral load (V), kita dapat melihat perilaku geser kolom beton bertulang mutu tinggi pada 9 spesimen kolom yang telah dilakukan uji eksperimen untuk mendapatkan perilaku geser kolom bertulang mutu tinggi.

3.6 Perbandingan Perilaku Geser Kolom Beton Bertulang Mutu Tinggi

Setelah kita mendapatkan perilaku geser kolom beton bertulang mutu tinggi dengan menggunakan metode USFM dan metode Modified USFM, selanjutnya akan dibandingkan antara hasil analisa numerik dengan hasil eksperimental yang telah dilakukan.

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Umum

Pada bab ini akan disajikan perbandingan perilaku geser kolom beton bertulang mutu tinggi antara hasil eksperimental dan dengan hasil analisa numerik. Analisa numerik dibagi menjadi dua, yaitu dengan menggunakan metode Uniaxial Shear Flexure dan menggunakan metode Modified Uniaxial Shear Flexure. Sehingga nanti dapat dilihat perbandingan antara 3 perilaku geser kolom beton bertulang mutu tinggi.

4.1 Perhitungan Nilai Kekuatan Leleh pada Tulangan Transversal

Untuk memodifikasi metode USFM ke metode Modified USFM, Faktor penting yang mempengaruhi pada metode Modified USFM adalah nilai kekuatan leleh pada tulangan transversal yang nantinya digunakan untuk menghitung perilaku kolom beton bertulang mutu tinggi. Pada Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa kelelahan tulangan transversal pada kolom beton bertulang mutu tinggi tidak tercapai pada 9 spesimen kolom. Sehingga untuk perhitungan modified USFM nilai F_s ini lah yang akan digunakan.

Tabel 4.1 Hasil Perhitungan Nilai Kekuatan Leleh yang Terjadi pada Tulangan Transversal

| Kolom | f'_c (Mpa) | ρ_w (%) | $P/A_g f'_c$ | Lateral Load (kN) | | |
|-------|-----------------|-----------------|--------------|-------------------|---------------|---------------|
| | | | | USFM | Modified USFM | Eksperimental |
| A-3.1 | 92.2 | 0.26 | 0.1 | 2206.68 | 2083.227 | 1817 |
| A-6 | 90.8 | 0.59 | | 2345.01 | 2321.466 | 1998.602444 |
| B-3.1 | 78 | 0.26 | 0.2 | 2306.32 | 2187.28 | 1998.602444 |
| B-5 | 78 | 0.41 | | 2728.07 | 2663.732 | 2856.447577 |
| B-6 | 101.1 | 0.59 | | 3218.66 | 3147.058 | 2128.907535 |
| C-5 | 79.6 | 0.41 | 0.3 | 3108.56 | 3020.644 | 2399.980599 |
| C-6 | 80.3 | 0.59 | | 3375.41 | 3345.341 | 3048.260323 |
| D-5 | 82.8 | 0.41 | 0.4 | 3363.38 | 3258.689 | 2560.343573 |
| D-6 | 84.9 | 0.59 | | 3861.53 | 3827.332 | 2535.339193 |

4.2 Perhitungan Nilai Lateral Load

Terdapat nilai lateral load pada analisa perhitungan numerik yang telah dihitung, dari hasil ini dapat dilihat pada Tabel 4.2 bahwa Kolom A-3.1, A-6, B-3.1, B-5, C-5 memiliki hasil yang mirip jika dibandingkan antara metode USFM, metode Modified USFM dan hasil Eksperimental. Sedangkan untuk tipe Kolom B-6, C-6, D-6 memiliki hasil yang kurang mirip jika dibandingkan dengan hasil eksperimental yang telah dilakukan. Pada tipe Kolom B-6, C-6, D-6 mempunyai tulangan sengkang yang lebih banyak, perlu diadakan penilitan lebih lanjut untuk memprediksi tipe kolom yang memiliki tulangan sengkang yang banyak.

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Lateral Load

| Kolom | f'_c (Mpa) | ρ_w (%) | $P/A_g f'_c$ | Yield of Transversal Reinforcement (Mpa) | |
|-------|-----------------|-----------------|--------------|--|---------------|
| | | | | Modified USFM | Eksperimental |
| A-3.1 | 92.2 | 0.26 | 0.1 | 749.372721 | 862 |
| A-6 | 90.8 | 0.59 | | 837.319951 | 862 |
| B-3.1 | 78 | 0.26 | 0.2 | 763.670201 | 862 |
| B-5 | 78 | 0.41 | | 815.536757 | 862 |
| B-6 | 101.1 | 0.59 | | 825.451986 | 862 |
| C-5 | 79.6 | 0.41 | 0.3 | 813.408282 | 862 |
| C-6 | 80.3 | 0.59 | | 851.424576 | 862 |
| D-5 | 82.8 | 0.41 | 0.4 | 809.317658 | 862 |
| D-6 | 84.9 | 0.59 | | 844.959478 | 862 |

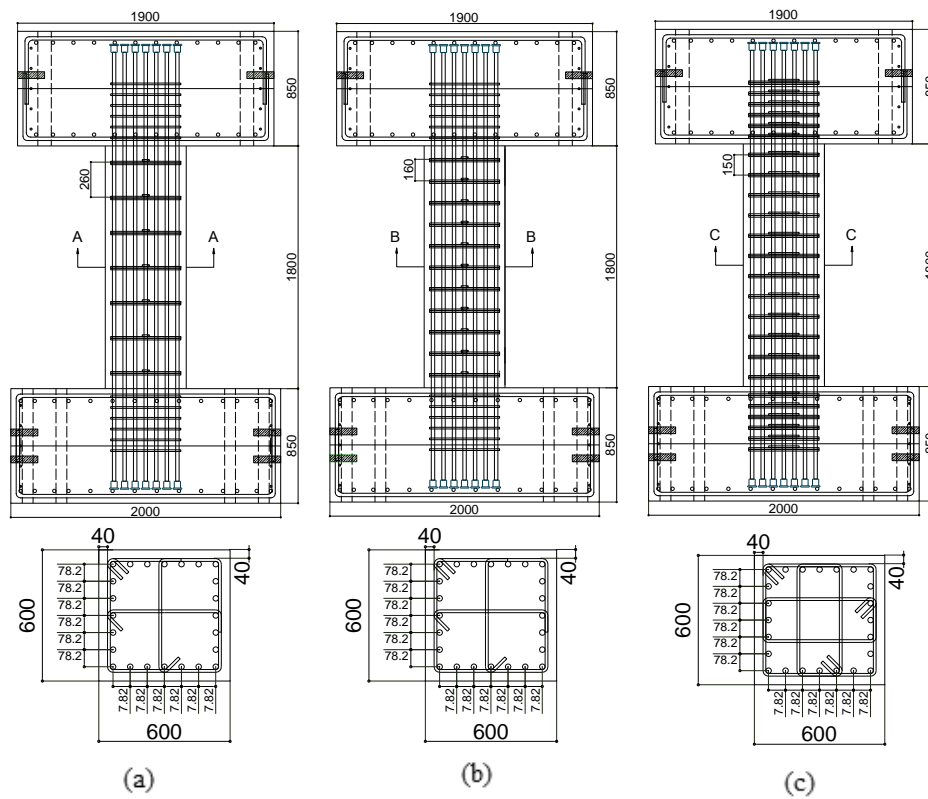
4.3 Hasil Perbandingan Perilaku Kolom Beton Bertulang Mutu Tinggi

Dari hasil analisis numerik menggunakan metode USFM dan menggunakan metode modifikasi USFM. Perilaku dari kekuatan geser pada kolom beton hampir mendekati dengan hasil dari eksperimental. Pada Gambar 4.2 menunjukkan bahwa hasil hubungan antara beban lateral (kN) dan total drift ratio pada spesimen kolom A3-1 menunjukkan hasil yang hampir sama. Tulangan transversal belum mencapai leleh untuk perhitungan dengan metode modified USFM. Pada Gambar 4.3 menunjukkan bahwa hasil spesimen kolom A6 antara analisis numerik dan hasil eksperimental menunjukkan hasil yang mirip. Pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa hasil spesimen kolom B3-1 hampir sama antara hasil dari metode modified USFM

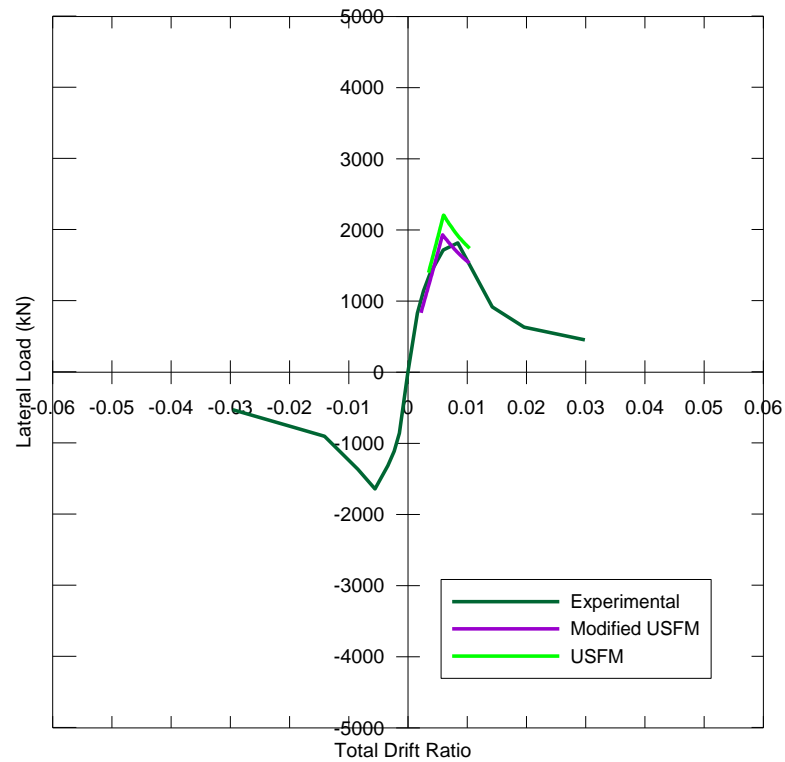
dengan hasil eksperimental, kejadian ini terjadi dikarenakan tulangan transversal pada kolom B3-1 belum leleh. Pada Gambar 4.5 menunjukan spesimen kolom B5. Beban lateral pada hasil eksperimental lebih tinggi jika dibandingkan dengan hasil analisis numerik. Ddiuga dikarenakan pada analisis numerik diperkirakan tulangan transversal belum mencapai leleh, sedangkan pada hasil eksperimental kemungkinan pelelehan pada tulangan transversal terjadi.

Tabel 4.3 Data Spesimen Kolom

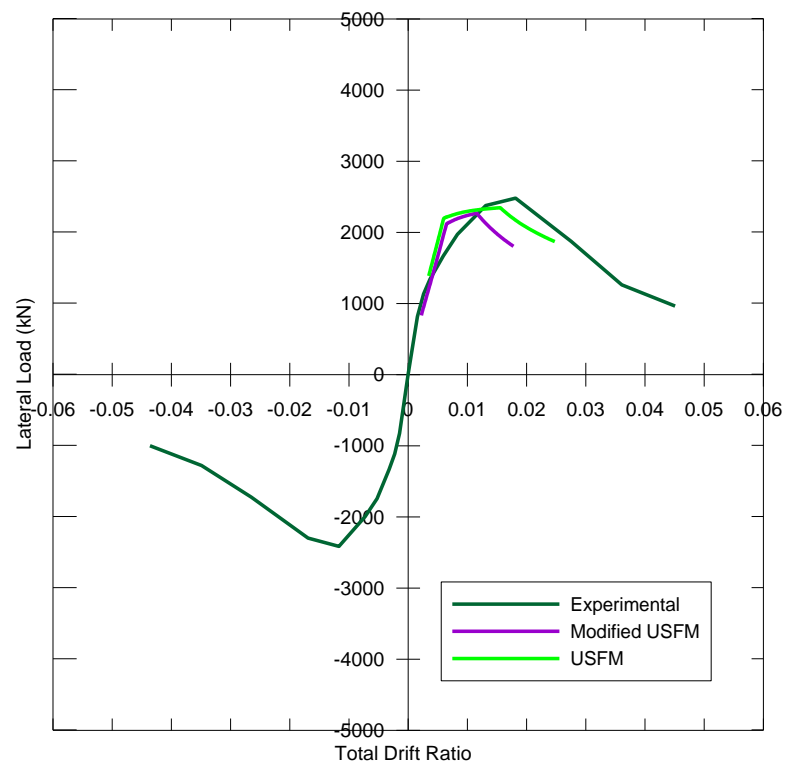
| Kolom | Rasio Beban Aksial | f'_{cs} | Tulangan Longitudinal | | Tulangan Transversal | | Diameter | Beban Aksial Tekan (kN) |
|-------|--------------------------|-----------|-----------------------|-------|----------------------|------|----------|----------------------------------|
| | | (MPa) | SD 685 | | SD 785 | | (mm) | |
| | | | f_{yls} | | f_{yts} | | | |
| | | (MPa) | ρ_l | (MPa) | ρ_t | | | |
| A-3.1 | 0.1 | 92.2 | | | | 0.26 | D-13-260 | 3319 |
| A-6 | | 90.8 | | | | 0.59 | D-13-150 | 3268 |
| B-3.1 | 0.2 | 79 | | | | 0.26 | D-13-260 | 5616 |
| B-5 | | 78 | | | | 0.41 | D-13-160 | 5616 |
| B-6 | | 101.1 | 735 | 3.38 | 862 | 0.59 | D-13-150 | 7272 |
| C-5 | 0.3 | 79.6 | (24D25) | | | 0.41 | D-13-160 | 8596 |
| C-6 | | 80.3 | | | | 0.59 | D-13-150 | 8672 |
| D-5 | 0.4 | 82.8 | | | | 0.41 | D-13-160 | 11923 |
| D-6 | | 84.9 | | | | 0.59 | D-13-150 | 12225 |



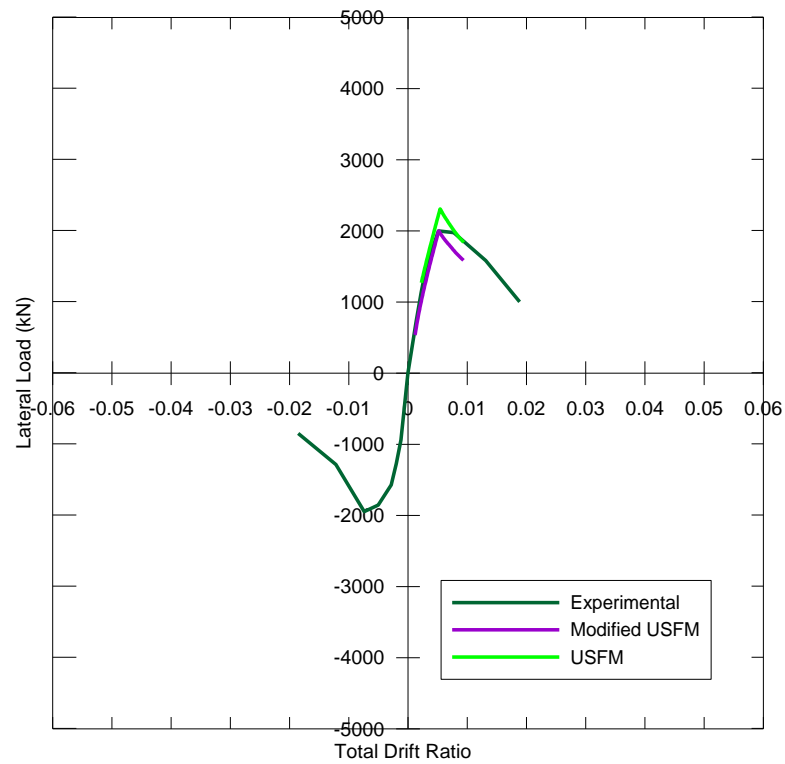
Gambar 4.1 Desain Spesimen: (a) spesimen A-3.1, B-3.1; (b) spesimen B-5, C-5, D-5; (c) spesimen A-6, B-6, C-6, D-6



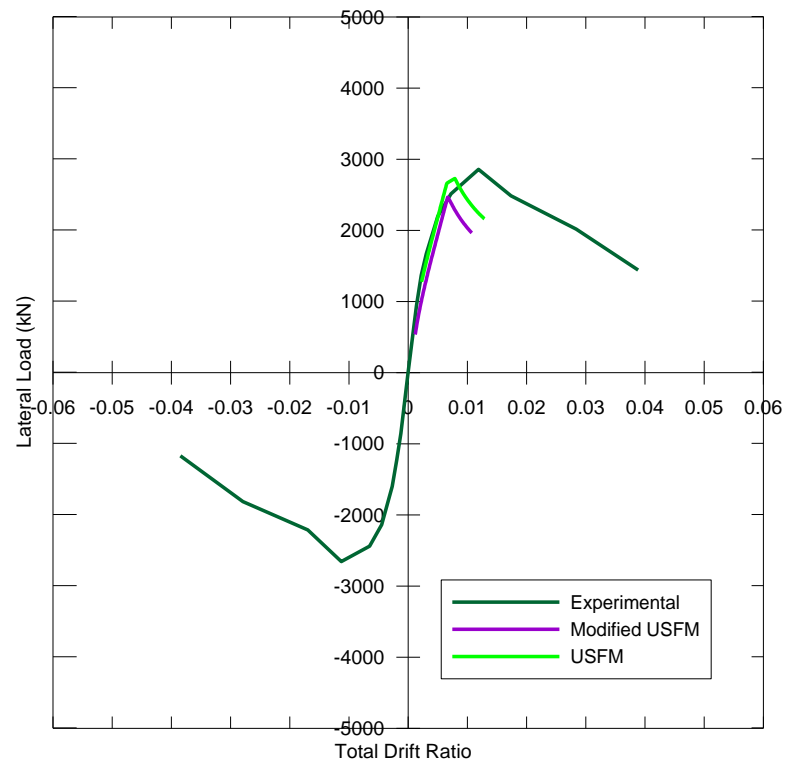
Gambar 4.2 Lateral load vs total drift ratio A 3-1



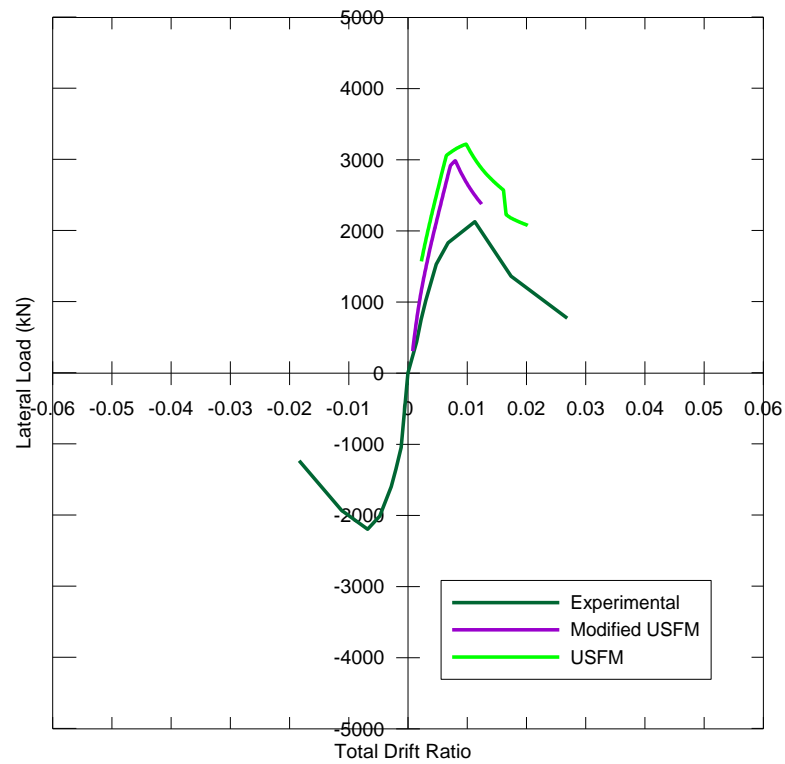
Gambar 4.3 Lateral load vs total drift ratio A 6



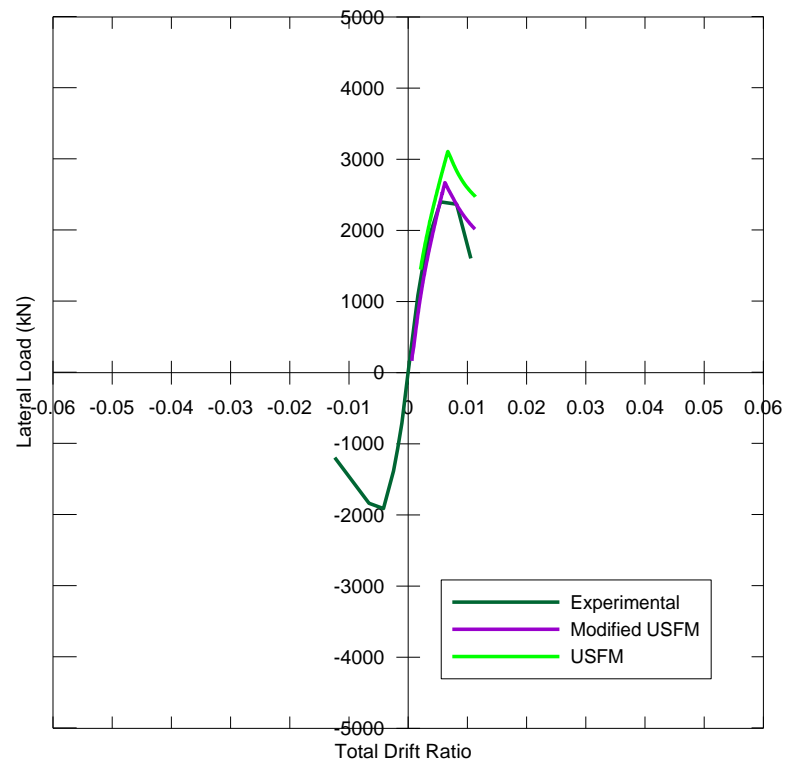
Gambar 4.4 Lateral load vs total drift ratio B 3-1



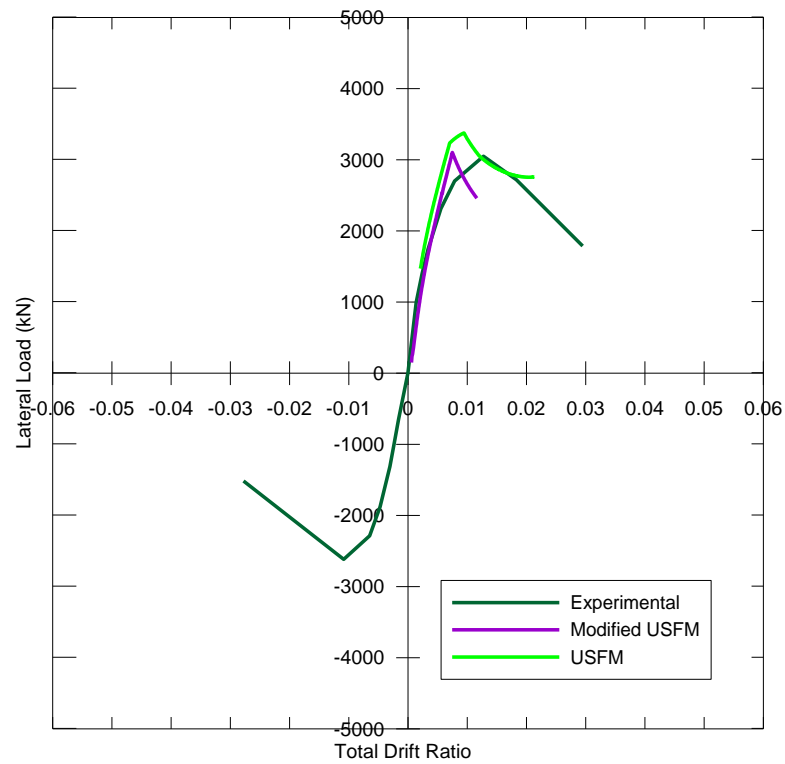
Gambar 4.5 Lateral load vs total drift ratio B 5



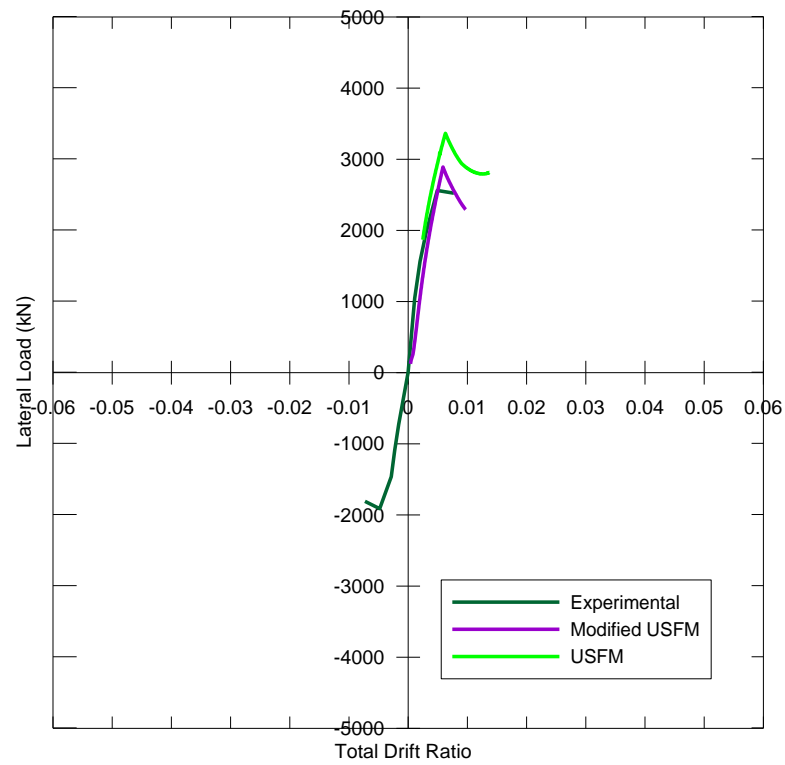
Gambar 4.6 Lateral load vs total drift ratio B 6



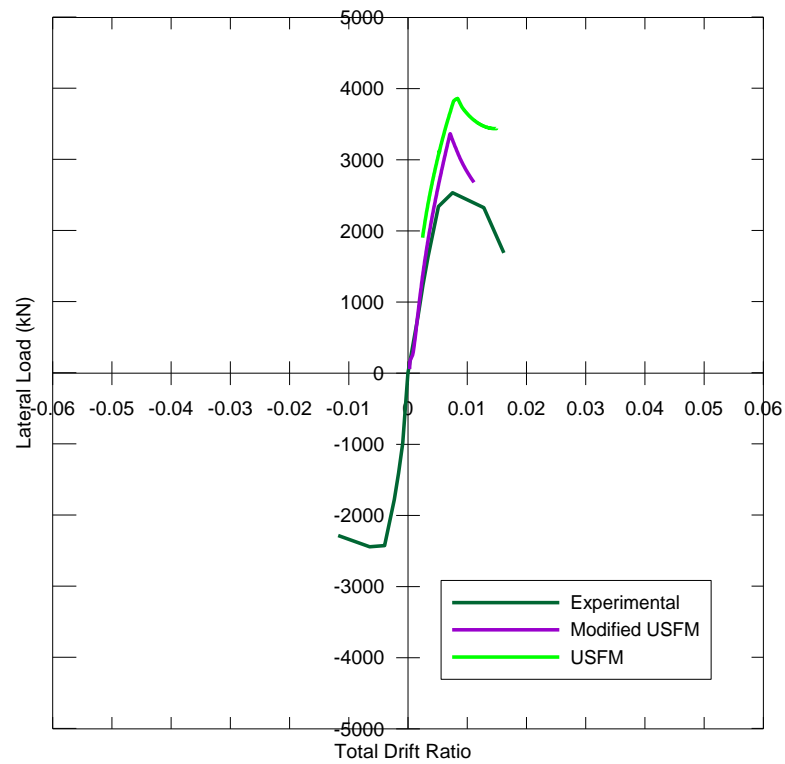
Gambar 4.7 Lateral load vs total drift ratio C 5



Gambar 4.8 Lateral load vs total drift ratio C 6



Gambar 4.9 Lateral load vs total drift ratio D 5



Gambar 4.10 Lateral load vs total drift ratio D 6

Gambar 4.6 sampai Gambar 4.10 menunjukkan spesimen kolom B6, C5, C6, D5, D6. Terdapat perbedaan yang cukup besar antara hasil analisis numerik dengan hasil eksperimental. Diduga, dikarenakan desain spesimen tidak terjadi kegagalan pada kondisi geser, melainkan pada kondisi lentur.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan pembahasan dan analisa dari hasil-hasil yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Semua dari design spesimen mempunyai tulangan transversal yang belum mencapai kelelahan.
2. Perilaku geser dengan menggunakan metode USFM memiliki hasil yang menyerupai dari hasil eksperimental
3. Perilaku geser dengan menggunakan metode modified USFM memiliki hasil yang lebih menyerupai dari hasil eksperimental jika dibandingkan dengan menggunakan hasil USFM
4. Perlu dikaji lebih lanjut untuk mengetahui kolom dengan mempunyai kaki sengkang yang banyak, dikarenakan hasil eksperimental dan hasil analisa numerik memiliki perbedaan yang *significant*.
5. Perilaku antara modified USFM, USFM dan hasil dari eksperimental mempunyai perilaku yang menyerupai.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- ✓ Aoyama, H. 2001. *Design of Modern Highrise Reinforced Concrete Structures*, Imperial College Press, London, UK.
- ✓ Caldarone, M. A. 2008. *High-Strength Concrete - A Practical Guide*, Taylor & Francis, New York, USA.
- ✓ Harun Alrasyid. 2016. "Seismic Shear Behavior of High-Strength Reinforced Concrete Columns." PhD Thesis, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei, Taiwan.
- ✓ Lee, J.-Y., Choi, I.-J., and Kim, S.-W. 2011. "Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams with High-Strength Stirrups." *ACI Structural Journal*, 108 (5) : 620-629.
- ✓ Miyajima, M. 2010. "The Japanese Experience in Design and Application of Seismic Grade Rebar." *Proc., International Seminar on Production and Application of High Strength Seismic Grade Rebar Containing Vanadium*.
- ✓ Mostafaei, H., Vecchio, F.J., and Kabeyasawa, T. 2008. "Nonlinear Displacement-Based Response Prediction of Reinforced Concrete Columns." *Journal of Engineering Structures*, 30 (3) : 2436-2447.
- ✓ Mostafaei, H., Vecchio, F.J. 2008. "Uniaxial Shear-Flexure Model for Reinforced Concrete Elements." *Journal of Engineering Structures*
- ✓ Mostafaei, H., and Kabeyasawa, T. 2007. "Axial-Shear-Flexure Interaction Approach for Reinforced Concrete Columns." *ACI Structural Journal*
- ✓ Nishiyama, Minehiro. 2009. "Mechanical Properties of Concrete and Reinforcement." *Journal of Advanced Concrete Technology Vol.7, No.2, 157-182*.
- ✓ Ou, Y.-C., and Kurniawan, D. P. 2015a. "Shear Behavior of Reinforced Concrete Columns With High-Strength Steel and Concrete." *ACI Structural Journal*, 112 (1) : 35-45.
- ✓ Ou, Y.-C., and Kurniawan, D. P. 2015b. "Effect of Axial Compression on Shear Behavior of High-Strength Reinforced Concrete Columns." *ACI Structural Journal*, 112 (2) : 209-220.

- ✓ Salim Razvi and Murat Saatcioglu. 1999. "Confinement Model for High-Strength Concrete." *Journal of Structural Engineering*.
- ✓ Watanabe, F., and Kabeyasawa, T. 1991. "Shear Strength of RC Members with High-Strength Concrete." *Proc., SP-176: High-Strength Concrete in Seismic Regions*, 379-396.

LAMPIRAN

Perhitungan Nilai F_s

Input :

Modulus elastisitas baja (E_s) = 200000 Mpa

Lebar penampang bersih (B_c) = 520 mm

Jarak tulangan transversal (S) = 260 mm

Jarak tulangan longitudinal (S_l) = 78.2 mm

Luas penampang tulangan longitudinal (A_{sx}) = $0.25 \times \pi \times d^2 \times n_x$
 = $0.25 \times \pi \times 13^2 \times 3$
 = 398.1969 mm²

Luas penampang tulangan transversal (A_{sy}) = $0.25 \times \pi \times d^2 \times n_y$
 = $0.25 \times \pi \times 13^2 \times 3$
 = 398.1969 mm²

Lebar penampang bersih arah x (B_{cx}) = 520 mm

Lebar penampang bersih arah y (B_{cy}) = 520 mm

Kuat tekan beton (F'_{co}) = 92.2 Mpa

Rasio tulangan longitudinal (ρ_c) = $\frac{\sum_{i=1}^n (A_{sx})_i + \sum_{j=1}^n (A_{sy})_j}{[s(b_{cx} + b_{cy})]}$
 = 0.002945

Koefisien efisiensi tualngan pengekanan = $0.15 \sqrt{\left(\frac{b_c}{s}\right) \left(\frac{b_c}{s_1}\right)} \leq 1.0$
 = $0.948171 \leq 1.0$

Tegangan leleh yang terjadi (f_s) = $E_s \left(0.0025 + 0.0043 \sqrt{\frac{k_2 \rho_c}{f'_{co}}} \right) \leq f_{yt}$
 = 749.3727 Mpa

Perhitungan USFM

Input :

| | |
|---|-------------------------------|
| Axial load (P) | = -3319000 N |
| Kuat tekan beton (f'_c) | = 92.2 mpa |
| Regangan tarik beton (ϵ_{cc}) | = -0.002 |
| Spasi retak arah x (S_{mx}) | = 260 mm |
| Spasi retak arah y (S_{my}) | = 78.2 mm |
| Ukuran Agregat (a) | = 10 mm |
| Tinggi Kolom (l) | = 1800 mm |
| Lebar Kolom (b) | = 600 mm |
| Tinggi Kolom (h) | = 600 mm |
| Decking (dd) | = 40 mm |
| Rasio tulangan longitudinal (ρ_x) | = 0.0327 |
| Tegangan leleh tulangan longitudinal (F_{yx}) | = 735 mpa |
| Diameter tulangan longitudinal | = 25 mm |
| Diameter tulangan sengkang | = 13 mm |
| Luas tulangan tarik (A_s) | = 3436.116965 mm ² |
| Luas tulangan tekan (A_s') | = 3436.116965 mm ² |
| Modulus elastisitas baja (E_s) | = 200000 mpa |
| Rasio tulangan transversal (ρ_y) | = 0.002552544 |
| Tegangan leleh tulangan transversal (F_{yy}) | = 862 mpa |
| Spasi tulangan transversal (hs) | = 26 cm |
| Rasio volume sengkang (ρ_y) | = 0.003326816 |

$$f_t = \frac{1}{3} \sqrt{f'_c}$$

$$f_t = 3.17 \text{ mpa}$$

$$K_t = -2\sqrt{\frac{f'_c}{\varepsilon_c}}$$

$$K_t = 92200 \text{ mpa}$$

$$\varepsilon_t = \frac{f_t}{K_t}$$

$$\varepsilon_t = 0.000034368$$

$$\text{Tinggi Efektif (d)} = 560 \text{ mm}$$

$$\text{Tegangan aksial } (\sigma_o) = \frac{P}{bh}$$

$$= -9.21944444 \text{ mpa}$$

$$\text{Panjang lengan curvature} = 900 \text{ mm}$$

$$\phi_y = \frac{f_{yx}/E_s}{(0.6(h-2dd))}$$

$$\phi_y = 0.000011779$$

$$K = 1 + \frac{\rho_w}{F_{yy}}$$

$$K = 1.0311$$

$$Z_m = \frac{0.5}{\left(\frac{(3+0.29f_c)}{(145f_c-1000)} + 0.75\rho_w \sqrt{\left(\frac{h-2d}{h_s 10} \right)} - \|\varepsilon_{cc}\|k \right)}$$

$$Z_m = 129.177$$

$$f_p = kf_{cc}$$

$$f_p = 95.07 \text{ mpa}$$

$$\varepsilon_p = k\varepsilon_c$$

$$\varepsilon_p = -0.002062206$$

$$\varepsilon_{cf} = -0.0007$$

$$\text{Regangan tekan beton (ccs)} = -0.0005$$

$$\begin{aligned} \text{Compression block (a)} &= \frac{ccs \times h}{(2.353ccs - 1.353\varepsilon_{cf})} \\ &= 1307.76 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Curvature } (\phi) &= \frac{\varepsilon_{cf}}{\left(0.5h - \frac{a}{0.85}\right)} \\ &= -0.00000057 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Strain in cover concrete (scc)} &= -\frac{\phi \times a}{0.85} \\ &= -0.000869 \end{aligned}$$

$$\text{Regangan tulangan tarik } (\varepsilon_s) = -0.000553$$

$$\text{Regangan tulangan tekan } (\varepsilon_s') = -0.000847$$

Dengan menggunakan grafik maka akan didapatkan,

$$\text{Tegangan pada tulangan tarik (fs)} = -110.61 \text{ mpa}$$

$$\text{Tegangan pada tulangan tekan (fs')} = -169.39 \text{ mpa}$$

$$\text{Tegangan beton di kondisi ccs (fc)} = -40.51 \text{ mpa}$$

$$\varepsilon_o = \frac{\left(P \times h - 1.7391 \times h \times ccs \times \left(\frac{A_s f_s}{\varepsilon_s} + \frac{A_s' f_s'}{\varepsilon_s'} + \frac{abf_c}{ccs}\right)\right)}{2 \left(\frac{A_s' f_s'}{\varepsilon_s'} d + \frac{A_s f_s}{\varepsilon_s} d' + 0.5 \frac{abf_c}{ccs} a\right)} + 1.7391ccs$$

$$\varepsilon_o = -0.000490$$

Nilai ϵ_o dan ϵ_{cf} akan di iterasi terus menerus sampai kondisi ϵ_o mendekati ϵ_{cf} , sehingga didapatkan nilai baru. Nilai ϵ_{cf} adalah 0.000483

| | |
|---|---------------|
| Compression block (a) | =163.88 |
| Curvature (ϕ) | = 0.000000451 |
| Strain in cover concrete (scc) | = -0.000869 |
| Regangan tulangan tarik (ϵ_s) | = -0.001656 |
| Regangan tulangan tekan (ϵ_s') | = -0.000689 |

Dengan menggunakan grafik maka akan didapatkan,

| | |
|---|---------------|
| Tegangan pada tulangan tarik (f_s) | = 331.19 mpa |
| Tegangan pada tulangan tekan (f_s') | = -137.82 mpa |
| Tegangan beton di kondisi ccs | = -40.51 mpa |

$$\epsilon_o = \frac{\left(P \times h - 1.7391 \times h \times ccs \times \left(\frac{A_s f_s}{\epsilon_s} + \frac{A_s' f_s'}{\epsilon_s'} + \frac{abf_c}{ccs} \right) \right)}{2 \left(\frac{A_s' f_s'}{\epsilon_s'} d + \frac{A_s f_s}{\epsilon_s} d' + 0.5 \frac{abf_c}{ccs} a \right)} + 1.7391 ccs$$

$$\epsilon_o = -0.000483$$

$$\phi = \frac{\left(P - \left(\frac{A_s f_s}{\epsilon_s} + \frac{A_s' f_s'}{\epsilon_s'} + \frac{abf_c}{ccs} \right) 1.7391 ccs \right)}{\left(\frac{A_s' f_s'}{\epsilon_s'} d + \frac{A_s f_s}{\epsilon_s} d' + 0.5 \frac{abf_c}{ccs} a \right)}$$

$$\phi = 0.00000451 \text{ mpa}$$

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_o}{\left(\left(-2 \frac{f_p}{\epsilon_p} + \rho_x \epsilon_s \right) \right)}$$

$$\epsilon_a = -0.00009$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(\varepsilon_a + ccs)}{2}$$

$$\varepsilon_2 = -0.0003$$

$$\varepsilon_x = \frac{(\varepsilon_{cf} + \varepsilon_a)}{2}$$

$$\varepsilon_x = 0.0002$$

$$\varepsilon_y = 0.002 \text{ diasumsikan sudah mengalami kelelahan}$$

$$\tan \theta = \sqrt{\frac{|\varepsilon_x - \varepsilon_s|}{(\varepsilon_y - \varepsilon_2)}}$$

$$\tan \theta = 0.463$$

$$\gamma_s \max = \frac{(\varepsilon_y - \varepsilon_2)}{\tan} \times 2$$

$$\gamma_s \max = 0.002125388$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\gamma_s \max^2}{4 \times (\varepsilon_x - \varepsilon_2)} + \varepsilon_x$$

$$\varepsilon_1 = 0.002492$$

$$f_{c1} = \frac{0.33\sqrt{f_c}}{1/(1 + \sqrt{500\varepsilon_1})}$$

$$f_{c1} = 1.49736 \text{ mpali}$$

$$f_{cy} = -\rho_y f_y$$

$$f_{cy} = -2.2 \text{ mpa}$$

$$-\varepsilon_{yl} = -\frac{f_{yx}}{\varepsilon_s}$$

$$-\varepsilon_{yl} = -0.003675$$

$$\varepsilon_{yl} = \frac{f_{yx}}{\varepsilon_s}$$

$$\varepsilon_{yl} = 0.003675$$

$$\text{Tegangan beton di kondisi } \varepsilon_{yl} = 1.2755 \text{ mpa}$$

$$f_{cx} = \sigma_o - \varepsilon_{yl}$$

$$f_{cx} = -10.494947 \text{ mpa}$$

$$\tan \theta' = \sqrt{\frac{f_{c1} - f_{cy}}{f_{c1} - f_{cx}}}$$

$$\tan \theta' = 0.55528$$

$$\beta = \frac{1}{\left(0.8 - 0.34 \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{cc}}\right)\right)}$$

$$\beta = 0.817266$$

$$\text{Tegangan beton di kondisi } \varepsilon_2 \text{ (fc2)} = -20.747677 \text{ mpa}$$

$$\gamma_{f1} = \frac{l}{6 \min(f, f_y)}$$

$$\gamma_{f1} = 0.001352983$$

$$L_p = \min[(h/\tan \theta, (l/2), h)]/2$$

$$L_p = 300 \text{ mm}$$

$$\gamma_{f2} = \max[(f - f_y) \times L_p \times (l/2 - L_p/2) \times 2/l, 0]$$

$$\gamma_{f2} = 0$$

$$\gamma_f = \gamma_{f1} + \gamma_{f2}$$

$$y_f = 0.001352983$$

$$\theta_1 = a \tan(\tan \theta)$$

$$\theta_1 = 0.433371$$

$$\theta_2 = a \tan(\tan \theta')$$

$$\theta_2 = 0.506888$$

$$S_{cr1} = \frac{1}{\left| \frac{\cos(\theta_1)}{smx} \right| + \left| \frac{\sin(\theta_1)}{smy} \right|}$$

$$S_{cr1} = 112.859421$$

$$S_{cr2} = \frac{1}{\left| \frac{\cos(\theta_2)}{smx} \right| + \left| \frac{\sin(\theta_2)}{smy} \right|}$$

$$S_{cr2} = 104.488319$$

$$C_{w1} = \frac{S_{cr1}}{\varepsilon_1}$$

$$C_{w1} = 0.281214 \text{ mm}$$

$$C_{w2} = \frac{S_{cr2}}{\varepsilon_1}$$

$$C_{w2} = 0.260355 \text{ mm}$$

$$V_{cim1} = \frac{0.18\sqrt{f_c}}{(0.31 + (24C_{w1})/(a + 16))}$$

$$V_{cim1} = 3.034436 \text{ mpa}$$

$$V_{cim2} = \frac{0.18\sqrt{f_c}}{(0.31 + (24C_{w2})/(a + 16))}$$

$$V_{cim2} = 3.140628 \text{ mpa}$$

$$M = 0.5(d - dd) \times as \times fs - 0.5(d - dd) \times Ass \times fss - 0.5(h - cb) \times f_c \times b \times cb$$

$$M = 1287638016 \text{ kNm}$$

$$\tau_m = \frac{M \times 2}{l \times b \times h}$$

$$\tau_m = 3.974191 \text{ mpa}$$

$$\tau_{v1} = V_{cim1} + \left(\frac{\rho_y \times f_{yy}}{\tan} \right)$$

$$\tau_{v1} = 7.789718 \text{ mpa}$$

$$\tau_{v2} = V_{cim2} + \left(\frac{\rho_y \times f_{yy}}{\tan 1} \right)$$

$$\tau_{v2} = 7.103123 \text{ mpa}$$

$$\tau_v = \min(\tau_{v1}, \tau_{v2})$$

$$\tau_v = 7.103123 \text{ mpa}$$

$$\tau_{fa} = \frac{f_{c1} - f_{c2}}{(\tan 1 + 1 / \tan 1)}$$

$$\tau_{fa} = 9.441170 \text{ mpa}$$

$$\tau_{fb} = \frac{f_{c1} - f_{c2}}{(\tan + 1 / \tan)}$$

$$\tau_{fb} = 8.477855 \text{ mpa}$$

$$\tau_f = \min(\tau_{fa}, \tau_{fb})$$

$$\tau_{f2} = 8.477855 \text{ mpa}$$

$$\varepsilon_c = \frac{ccs + \varepsilon_a}{2}$$

$$\varepsilon_c = -0.000297$$

$$Total\gamma = ysm + yf$$

$$Total\gamma = 0.003478$$

$$Totalshearstress = \min([\tau_{f2}, \tau_v, \tau_m] \times [d/h] \times ((l/2)/(l/2 - dd)))$$

$$Totalshearstress = 3.88 \text{ mpa}$$

$$LateralLoad(V) = Totalshearstress \times (b/h) / 1000$$

$$LateralLoad(V) = 1397.44 \text{ kN}$$

Setelah itu nilai ccs akan ditambah untuk mendapatkan perilaku geser kolom beton bertulang mutu tinggi.

Perhitungan Modified USFM

Input :

| | |
|---|--------------|
| Axial load (P) | = -3319000 N |
| Kuat tekan beton (f'_c) | = 92.2 mpa |
| Regangan tarik beton (ε_{cc}) | = -0.002 |
| Spasi retak arah x (S _{mx}) | = 260 mm |
| Spasi retak arah y (S _{my}) | = 78.2 mm |
| Ukuran Agregat (a) | = 10 mm |
| Tinggi Kolom (l) | = 1800 mm |
| Lebar Kolom (b) | = 600 mm |
| Tinggi Kolom (h) | = 600 mm |
| Decking (dd) | = 40 mm |

| | |
|--|---------------------------------------|
| Rasio tulangan longitudinal (ρ_x) | = 0.0327 |
| Tegangan leleh tulangan longitudinal (F_{yx}) | = 735 mpa |
| Diameter tulangan longitudinal | = 25 mm |
| Diameter tulangan sengkang | = 13 mm |
| Luas tulangan tarik (A_s) | = 3436.116965 mm ² |
| Luas tulangan tekan (A_s') | = 3436.116965 mm ² |
| Modulus elastisitas baja (E_s) | = 200000 mpa |
| Rasio tulangan transversal (ρ_y) | = 0.002552544 |
| Tegangan leleh tulangan transversal (F_{yy}) | = 862 mpa |
| Tegangan leleh tulangan transversal yang terjadi (F_s) | = 749.3727 mpa |
| Spasi tulangan transversal (h_s) | = 26 cm |
| Rasio volume sengkang (ρ_v) | = 0.003326816 |
| Tinggi Efektif (d) | = 560 mm |
| Tegangan aksial (σ_o) | $= \frac{P}{bh}$ = -9.21944444 MPA |
| Panjang lengan curvature | = 900 mm |

$$F_y = \frac{f_{yx}}{E_s}$$

$$F_y = 0.000011779 \text{ mpa}$$

$$f_p = kf_{cc}$$

$$f_p = 95.07 \text{ mpa}$$

$$\varepsilon_p = k\varepsilon_c$$

$$\varepsilon_p = -0.002062206$$

$$\varepsilon_{cf} = -0.0005$$

$$\text{Regangan tekan beton (ccs)} = -0.0005$$

$$\begin{aligned} \text{Compression block (a)} &= \frac{ccs \times h}{(2.353ccs - 1.353\varepsilon_{cf})} \\ &= 600\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Curvature } (\phi) &= \frac{\varepsilon_{cf}}{\left(0.5h - \frac{a}{0.85}\right)} \\ &= -0.00000123 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Strain in cover concrete (scc)} &= -\frac{\phi \times a}{0.85} \\ &= -0.000869 \end{aligned}$$

$$\text{Regangan tulangan tarik } (\varepsilon_s) = -0.000180$$

$$\text{Regangan tulangan tekan } (\varepsilon_s') = -0.00082$$

Dengan menggunakan grafik maka akan didapatkan,

$$\text{Tegangan pada tulangan tarik (fs)} = -35.94\text{mpa}$$

$$\text{Tegangan pada tulangan tekan (fs)} = -164.06\text{mpa}$$

$$\text{Tegangan beton di kondisi ccs} = -19.39\text{mpa}$$

$$\varepsilon_o = \frac{\left(P \times h - 1.7391 \times h \times ccs \times \left(\frac{A_s f_s}{\varepsilon_s} + \frac{A_s' f_s'}{\varepsilon_s'} + \frac{abf_c}{ccs}\right)\right)}{2 \left(\frac{A_s' f_s'}{\varepsilon_s'} d + \frac{A_s f_s}{\varepsilon_s} d' + 0.5 \frac{abf_c}{ccs} a\right)} + 1.7391 ccs$$

$$\varepsilon_o = -0.000216$$

Nilai ε_o dan ε_{cf} akan di iterasi terus menerus sampai kondisi ε_o mendekati ε_{cf} , sehingga didapatkan nilai baru. Nilai ε_{cf} adalah 0.000483

$$\text{Compression block (a)} = 278.16\text{mm}$$

$$\text{Curvature } (\phi) = 0.00000266$$

$$\text{Strain in cover concrete } (scc) = -0.000869$$

$$\text{Regangan tulangan tarik } (\epsilon_s) = -0.000619$$

$$\text{Regangan tulangan tekan } (\epsilon_s') = -0.000763$$

Dengan menggunakan grafik maka akan didapatkan,

$$\text{Tegangan pada tulangan tarik } (f_s) = 123.76\text{mpa}$$

$$\text{Tegangan pada tulangan tekan } (f_s) = -152.69\text{mpa}$$

$$\text{Tegangan beton di kondisi ccs} = -19.39\text{mpa}$$

$$\epsilon_o = \frac{\left(P \times h - 1.7391 \times h \times ccs \times \left(\frac{A_s f_s}{\epsilon_s} + \frac{A_s' f_s'}{\epsilon_s'} + \frac{abf_c}{ccs} \right) \right)}{2 \left(\frac{A_s' f_s'}{\epsilon_s'} d + \frac{A_s f_s}{\epsilon_s} d' + 0.5 \frac{abf_c}{ccs} a \right)} + 1.7391 ccs$$

$$\epsilon_o = -0.000069$$

$$\phi = \frac{\left(P - \left(\frac{A_s f_s}{\epsilon_s} + \frac{A_s' f_s'}{\epsilon_s'} + \frac{abf_c}{ccs} \right) 1.7391 ccs \right)}{\left(\frac{A_s' f_s'}{\epsilon_s'} d + \frac{A_s f_s}{\epsilon_s} d' + 0.5 \frac{abf_c}{ccs} a \right)}$$

$$\phi = 0.00000267$$

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_o}{\left(\left(-2 \frac{f_p}{\epsilon_p} + \rho_x \epsilon_s \right) \right)}$$

$$\epsilon_a = -0.00013$$

$$\epsilon_2 = \frac{(\epsilon_a + ccs)}{2}$$

$$\epsilon_2 = -0.00032$$

$$\varepsilon_x = \frac{(\varepsilon_{cf} + \varepsilon_a)}{2}$$

$$\varepsilon_x = -0.0001$$

$$\varepsilon_y = 0.002$$

$$\tan \theta = \sqrt{\frac{|\varepsilon_x - \varepsilon_s|}{(\varepsilon_y - \varepsilon_2)}}$$

$$\tan \theta = 0.305$$

$$\gamma_{\text{max}} = \frac{(\varepsilon_y - \varepsilon_2)}{\tan} \times 2$$

$$\gamma_{\text{max}} = 0.001413513$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\gamma s m^2}{4 \times (\varepsilon_x - \varepsilon_2)} + \varepsilon_x$$

$$\varepsilon_1 = 0.002216$$

$$f_{c1} = \frac{0.33\sqrt{f_c}}{1/(1 + \sqrt{500\varepsilon_1})}$$

$$f_{c1} = 1.54379 \text{ mpa}$$

$$f_{cy} = -\rho_y f_y$$

$$f_{cy} = -1.53 \text{ mpa}$$

$$\varepsilon_{yl} = -\frac{f_{yx}}{\varepsilon_s}$$

$$\varepsilon_{yl} = -0.003675$$

$$\varepsilon_{yl} = \frac{f_{yx}}{\varepsilon_s}$$

$$\varepsilon_{yl} = 0.003675$$

$$\text{Tegangan beton di kondisi } \varepsilon_{yl} = -0.65651 \text{ mpa}$$

$$f_{cx} = \sigma_o - \varepsilon_{yl}$$

$$f_{cx} = -8.562938 \text{ mpa}$$

$$\tan \theta' = \sqrt{\frac{f_{c1} - f_{cy}}{f_{c1} - f_{cx}}}$$

$$\tan \theta' = 0.551620$$

$$\beta = \frac{1}{\left(0.8 - 0.34 \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{cc}}\right)\right)}$$

$$\beta = 0.84986$$

$$\text{Tegangan beton di kondisi } \varepsilon_2 \text{ (fc2)} = -10.416074 \text{ mpa}$$

$$\gamma_{f1} = \frac{l}{6 \min(f, f_y)}$$

$$\gamma_{f1} = 0.000800891$$

$$L_p = \min[(h / \tan \theta, (l / 2), h)] / 2$$

$$L_p = 300$$

$$\gamma_{f2} = \max[(f - f_y) \times L_p \times (l / 2 - L_p / 2) \times 2 / l, 0]$$

$$\gamma_{f2} = 0$$

$$\gamma_f = \gamma_{f1} + \gamma_{f2}$$

$$\gamma_f = 0.000800891$$

$$\theta_1 = a \tan(\tan)$$

$$\theta_1 = 0.29618$$

$$\theta_2 = a \tan(\tan 1)$$

$$\theta_2 = 0.504086$$

$$S_{cr1} = \frac{1}{\left| \frac{\cos(\theta_1)}{smx} \right| + \left| \frac{\sin(\theta_1)}{smy} \right|}$$

$$S_{cr1} = 134.934189$$

$$S_{cr2} = \frac{1}{\left| \frac{\cos(\theta_2)}{smx} \right| + \left| \frac{\sin(\theta_2)}{smy} \right|}$$

$$S_{cr2} = 104.774384$$

$$C_{w1} = \frac{S_{cr1}}{\varepsilon_1}$$

$$C_{w1} = 0.298970 \text{ mm}$$

$$C_{w2} = \frac{S_{cr2}}{\varepsilon_1}$$

$$C_{w2} = 0.232146 \text{ mm}$$

$$V_{cim1} = \frac{0.18\sqrt{f_c}}{(0.31 + (24C_{w1})/(a + 16))}$$

$$V_{cim1} = 2.949586 \text{ mpa}$$

$$V_{cim2} = \frac{0.18\sqrt{f_c}}{(0.31 + (24C_{w2})/(a + 16))}$$

$$V_{cim2} = 3.296613 \text{ mpa}$$

$$M = 0.5(d - dd) \times as \times fs - 0.5(d - dd) \times Ass \times fss - 0.5(h - cb) \times f_c \times b \times cb$$

$$M = 767708736 \text{ kNm}$$

$$\tau_m = \frac{M \times 2}{l \times b \times h}$$

$$\tau_m = 2.369471 \text{ mpa}$$

$$\tau_{v1} = V_{cim1} + \left(\frac{\rho_y \times f_{yy}}{\tan} \right)$$

$$\tau_{v1} = 7.968427 \text{ mpa}$$

$$\tau_{v2} = V_{cim2} + \left(\frac{\rho_y \times f_{yy}}{\tan} \right)$$

$$\tau_{v2} = 6.07303 \text{ mpa}$$

$$\tau_v = \min(\tau_{v1}, \tau_{v2})$$

$$\tau_v = 6.07303 \text{ mpa}$$

$$\tau_{fa} = \frac{f_{c1} - f_{c2}}{(\tan + 1 / \tan)}$$

$$\tau_{fa} = 5.058173 \text{ mpa}$$

$$\tau_{fb} = \frac{f_{c1} - f_{c2}}{(\tan + 1 / \tan)}$$

$$\tau_{fb} = 3.338717 \text{ mpa}$$

$$\tau_f = \min(\tau_{fa}, \tau_{fb})$$

$$\tau_{f2} = 3.338717 \text{ mpa}$$

$$\varepsilon_c = \frac{CCS + \varepsilon_a}{2}$$

$$\varepsilon_c = -0.000316$$

$$Total\gamma = \gamma_{sm} + \gamma_f$$

$$Total\gamma = 0.002214$$

$$Total\text{shearstress} = \min([\tau_{f2}, \tau_v, \tau_m] \times [d/h] \times ((l/2)/(l/2 - dd)))$$

$$Total\text{shearstress} = 2.31 \text{ mpa}$$

$$Lateral\text{Load}(V) = Total\text{shearstress} \times (b/h)/1000$$

$$Lateral\text{Load}(V) = 833.17 \text{ kN}$$

Setelah itu nilai ϕ akan ditambah untuk mendapatkan perilaku geser kolom beton bertulang mutu tinggi.